

**EXPERIMENTELLE UNTERSUCHUNGEN
DER WÄRMEENTWICKLUNG
IM PULPAKAVUM BEI HOCH - UND
HÖCHSTTOURIGEM SCHLEIFEN**

WALTER ROTHLAUF

~~1987~~

Disbui. München

1988





Digitized by the Internet Archive
in 2026

https://archive.org/details/IA41555421_0008

Aus der Poliklinik für Zahnärztliche Prothetik der
Universität München

Vorstand Prof. Dr. E.Kraft

**EXPERIMENTELLE UNTERSUCHUNGEN
DER WARMEENTWICKLUNG
IM PULPAKAVUM BEI HOCH- UND
HÖCHSTTOURIGEM SCHLEIFEN**

Dissertation

zum Erwerb des Doktorgrades der Zahnheilkunde
an der Medizinischen Fakultät der
Ludwig-Maximilians-Universität zu München

vorgelegt von
Walter Rothlauf

aus
München

1987

Mit Genehmigung der Medizinischen Fakultät
der Universität München

Berichterstatter: Priv.- Doz. Dr. H.-Ch. Lauer

Mitberichterstatter: Prof. Dr. E. Kraft

Prof. Dr. E. Sonnabend

Dekan: Prof. Dr. W. Spann

Tag der mündlichen Prüfung: 23.02.1988

I N H A L T S A N G A B E

	Seite
1. EINLEITUNG	1
2. EINFÜHRUNG	3
2.1 Biologische Grundlagen	3
2.1.1 Die Zahnpräparation	3
2.1.2 Reaktion der Zahnpulpa	5
2.1.3 Die physiologische Grenztemperatur	8
2.1.4 Klinische Folgen des Präparationstraumas	9
2.2 Thermische Grundlagen des Schleifprozesses	11
2.2.1 Die Wärmeentwicklung bei der Präparation	11
2.2.2 Bisherige Temperaturmessungen an den Zahnhartsubstanzen und im Pulpakavum	14
2.2.3 Umgebungsbedingungen und ihr thermischer Einfluß auf den Schleifprozess	20
2.3 Gerätetechnische Grundlagen	23
2.3.1 Grundlegender Vergleich der Antriebssysteme zahnärztliche Turbine und Mikromotor	23
2.3.2 Die unterschiedliche Bewertung des Präparations- traumas von Turbine und Mikromotor	24
2.4 Problemstellung	28

3.	MATERIAL UND METHODE	29
3.1	Beschreibung der verwendeten Geräte	29
3.1.1	Die Antriebssysteme Turbine und Mikromotor	29
3.1.1.1	Die Drehzahl der rotierenden Instrumente	31
3.1.1.2	Die Vorschubkraft beim Schleifprozess	33
3.1.1.3	Das Spraysystem	34
3.1.1.4	Sprayluft, Kühlwassermenge und Kühlwassertemperatur	34
3.1.2	Verwendete Schleifkörper	37
3.2	Der Versuchsaufbau zur Simulation der in-vivo - Bedingungen	38
3.2.1	Die Schnellspannvorrichtung nach LAUER	39
3.2.2	Der Luftschlittentisch	41
3.2.3	Das geschlossene Plexiglasgehäuse zur Simulation der Mundhöhlentemperatur	44
3.3	Die Temperaturmessung und -aufzeichnung im Pulpakavum	46
3.3.1	Die Thermoelemente	46
3.3.2	Die Temperaturmeßgeräte	48
3.3.3	Der xt-Schreiber	50
3.4	Versuchsdurchführung	51
3.4.1	Zahnauswahl, -konservierung und -vorbereitung	51
3.4.2	Exemplarische Beschreibung des Versuchsablaufs	53

4.	ERGEBNISSE	57
4.1	Darstellung des Temperaturverlaufs im Pulpakavum in Abhängigkeit verschiedener Präparationssysteme	57
4.1.1	Höchsttourige Präparation unter Verwendung der Turbine; Kühlwassertemperatur: 29,8 - 31,8° C	57
4.1.2	Hochtourige Präparation unter Verwendung des Mikromotors mit Schnellaufwinkelstück; Kühlwassertemperatur: 31,4 - 33,7° C	61
4.1.3	Höchsttourige Präparation unter Verwendung der Turbine; Kühlwassertemperatur: 42,2 - 44,4° C	65
4.1.4	Hochtourige Präparation unter Verwendung des Mikromotors mit Schnellaufwinkelstück; Kühlwassertemperatur: 42,1 - 43,6° C	69
4.2	Vergleich der relativen Temperaturänderung im Pulpakavum bei Präparation mit der Turbine und dem Schnellaufwinkelstück	73
4.3	Der Einfluß nicht exakt standardisierbarer Parameter auf die relative Temperaturerhöhung im Pulpakavum bei Präparation mit Turbine und Schnellaufwinkelstück	79
4.3.1	Einfluß von Kühlwassertemperatur, Schleifzeit und Restdentinstärke bei der Turbinenpräparation	80
4.3.2	Einfluß von Kühlwassertemperatur, Schleifzeit und Restdentinstärke bei Präparation mit dem Schnellaufwinkelstück	84

5. DISKUSSION	88
5.1 Bewertung der Anwendung von Turbine und Mikromotor in der zahnärztlichen Praxis	88
5.2 Der Schleifprozess und seine Auswirkung auf die Temperatur im Pulpakavum	96
5.3 Bedeutung der Kühlwassertemperatur beim Schleif- prozess	101
6. ZUSAMMENFASSUNG	104
7. LITERATUR	106

1. EINLEITUNG

Bis in die fünfziger Jahre konnten in der prothetischen und konservierenden Zahnheilkunde Zahnpräparationen nur unter großem Zeitaufwand mit dem Doriot-Gestänge oder der elektrischen Bohrmaschine erfolgen. Effektiveres Bohren und Schleifen wurde erst mit der Einführung von Antriebsaggregaten möglich, die in hoch- und höchsttourige Umdrehungsbereiche vorstießen. Dies wurde erstmals durch die 1957 vorgestellte Luftturbine von Dr. J. V. Borden erreicht, die Umdrehungszahlen bis 400 000 U/min erzielte (GÖHLICH (16)). Ähnliche Erfolge konnte der 1966 eingeführte elektrische Mikromotor verbuchen, der Geschwindigkeiten bis 40 000 U/min zuließ (GARNIER und HOHMANN (15)). Ungeachtet ihrer verschiedenen Grundkonzeption brachten beide Systeme durch ihre Vibrationsarmut und ihre bis dahin unerreichten Schleifleistung vielfältige Erleichterungen für Patient und Zahnarzt während der zahnärztlichen Behandlung. Es müssen jedoch auch Schädigungen der Zahnsubstanzen in Betracht gezogen werden, die mit dem technischen Vorstoß in den hoch- und höchsttourigen Bohr- und Schleifprozeß zusammenhängen. Nach der Überkronung von Zähnen und dem damit verbundenen Präparationstrauma werden vielfach Pulpaschädigungen beschrieben, die bis zum Vitalitätsverlust des restaurativ behandelten Zahnes führen können (24, 25, 31, 71). Die Ursachen, die von einer Schädigung der Pulpa bis zur Pulpanekrose führen können, sind sehr komplex und isoliert für sich nur sehr schwer zu beurteilen. Neben der kariösen Vorschädigung des Zahnes, über die medikamentöse Behandlung, eine Desiccation des beschliffenen Stumpfes, die Abdrucknahme und Provisorienherstellung bis zur Verwendung toxischer Zemente, steht dabei das eigentliche Präparations-trauma mit seinen mechanischen und thermischen Noxen im Mittelpunkt des allgemeinen Interesses. Vielfach konnten nach hoch- und höchsttouriger Zahnpräparation schädigende Wirkungen auf die Zahnhartsubstanzen und das Pulpagewebe mit

histologischen Untersuchungen, sowie Temperaturmessungen in und am Zahn dargestellt werden. Dabei erfolgte meist eine recht unterschiedliche Beurteilung der im hoch- bzw. höchsttourigen Bereich arbeitenden Antriebssysteme - des zahnärztlichen Mikromotors und der Turbine - sowie der verschiedenen Kühlsysteme. Ein Grund dafür mag sicherlich in der ständigen Weiterentwicklung und technischen Vervollkommnung beider Antriebsarten liegen; sehr oft wurde aber auch unter sehr verschiedenartigen Laborbedingungen gearbeitet, die einen Vergleich der gewonnenen Ergebnisse nicht zulassen. Die Umgebungsbedingungen des zahnärztlichen Arbeitsfeldes, die nach FUHR (13) sowie STUBEN und HOPPE (64) von großer Bedeutung für die Aussagekraft von Temperaturmessungen im Pulpakavum oder den Zahnhartsubstanzen sind, wurden dabei meist außer Acht gelassen.

Ziel dieser Untersuchungen war es, unter Berücksichtigung aller bisher gewonnenen Ergebnisse den Schleifvorgang und das damit verbundene Präparationstrauma in Bezug auf Antriebsart und Kühlung zu beurteilen. Dazu wurde eine Versuchsanordnung entwickelt, die die Situation im Mund des Patienten simulieren soll.

2. EINFÜHRUNG

2.1 Biologische Grundlagen

2.1.1 Die Zahnpräparation

Die Zahnpräparation ist physikalisch gesehen ein vielfach wiederholter Arbeitsgang, bei dem mittels eines rotierenden Werkzeugs, des Bohrers mit seinen scharfen Schneiden, von einem Werkstück - in diesem Fall dem Zahn - Substanz abgetragen wird. Dabei wird mechanische Arbeit verrichtet. Die Kraftkomponente ist dabei die an der Berührungsfläche tangential wirkende "Schleifkraft", die von der Kraft abhängt, mit welcher der Zahnarzt das Schleifinstrument an den Zahn andrückt. Sie wird auch "Andruckkraft", "Vorschubkraft" oder "Normalkraft" genannt. Aus der Umdrehungsgeschwindigkeit des Schleifkörpers, die sich aus Umdrehungszahl pro Zeiteinheit und Umfang des Schleifkörpers zusammensetzt, sowie der Zeit, ergibt sich der Faktor "Weg". Die Arbeit des Schleifprozesses bei der Zahnpräparation ist somit von den Faktoren "Kraft, Weg und Zeit" abhängig. Mit dem Eindringen in hoch- und höchsttourige Drehzahlbereiche kann dabei einerseits eine immer größere Schleifleistung erbracht werden und andererseits die Schleifkraft immer stärker reduziert werden. Die kinetische Energie einer Schneidekante oder eines Diamantkristalls am Schleifkörper ist dabei so groß, daß bei geringer Vorschubkraft kleine Partikel vom Zahnschmelz oder Dentin abgesprengt werden können. Die Berührungszeit der einzelnen Schneidekante mit dem Zahn ist dabei so kurz, daß es aufgrund der Massenträgheit kaum zur Entstehung einer Druckwelle kommt, die häufig als einer der schmerzauslösenden Faktoren bezeichnet wird (50). Kleinste Leistung und geringere Schmerzsensationen bei niedrigerer Vorschubkraft führen dabei in ihrer vielfachen Summation zu den Vorteilen der hoch- und höchsttourigen Kavitätenpräparation: hohe

Schleif- und Bohrleistung; bei geringer Schmerzempfindung. Dieser Umstand wird zusätzlich durch die Vibrationsarmut sehr hochtouriger Antriebseinheiten unterstützt.

Natürlich kann die mechanische Reizbildung, wenn auch in ihrem Einzelereignis minimiert, nicht vernachlässigt werden. Bei der Zahnpräparation werden im Dentin die vitalen Zellfortsätze der Odontoblasten verletzt, was zum Austritt von Zelliquor auf den präparierten Zahnstumpf führt. KETTERL (26) konnte dieses Phänomen in vivo nachweisen und bestimmte auch die Zahl der Odontoblastenfortsätze in Pulpanähe mit $68\,000/\text{mm}^2$ bei einem Durchmesser von $3,1\,\mu$ wesentlich höher als in der Peripherie mit $16\,000/\text{mm}^2$ bei einem Durchmesser von $1,7\,\mu$. Demnach nehmen pulpanah die Odontoblastenfortsätze 40% der Dentinoberfläche in Anspruch. Mit dem Schleifprozess an Zähnen scheint demnach immer ein Präparationstrauma verbunden zu sein, das mit zunehmender Schleifzeit und Schleiftiefe an Größe zunimmt. Neben der mechanischen Schädigung kommt dabei der Wärmeentwicklung als Funktion der Arbeitsleistung eine besondere Bedeutung zu. Die Meinungen über die Frage, ob die Wärmeentwicklung oder der mechanische Reiz auf den Inhalt der Dentinkanäle die Hauptursache für die Veränderungen der Pulpa darstellen, sind geteilt. Unumstritten ist jedoch, daß die Wärmeentwicklung mit allen anderen Faktoren, die zum Präparationstrauma beitragen, in engem Zusammenhang steht. Die Rolle des Ultraschalleffekts konnte dabei bis heute noch nicht geklärt werden und wird von den einzelnen Autoren verschieden beurteilt (18,25,31).

2.1.2 Reaktion der Zahnpulpa

Da sich die Zahnhartsubstanzen und das Pulpagewebe in der Dentinschicht durch Zellfortsätze von Pulpazellen, den sogenannten Tomesfasern, miteinander verflechten, bilden sie ein einheitliches System. Bei der Abtragung von Zahnhartsubstanzen während der Zahnpräparation wird deshalb auch das Pulpagewebe in Mitleidenschaft gezogen. Werden auch die einzelnen Faktoren, die zum Präparationstrauma führen, ziemlich unterschiedlich beurteilt, so findet sich doch eine große Übereinstimmung in der Beschreibung der histologischen Veränderungen, die nach dem zeitlichen Auftreten in primäre und sekundäre Pulpaveränderungen eingeteilt werden (63). Primäre Pulpaveränderungen finden Ausdruck in Alterationen, die unmittelbar nach der Präparation oder innerhalb von wenigen Stunden auftreten können. Sekundäre Pulpaveränderungen treten erst Tage bis Wochen nach dem traumatischen Schleifereignis in Erscheinung.

Zu den primären Pulpaveränderungen zählen :

(6,8,10,31,43,51,57,58,69)

- Odontoblastenverletzung durch calciotraumatische Veränderungen des Dentins, die sogenannte calcio-traumatic-response
- Verlagerung von Odontoblastenkernen in Dentinkanälchen, aspirated odontoblasts
- Reduzierung und Schrumpfung der Odontoblastenschicht
- verwaschene Strukturen und unscharfe Begrenzungen in der Odontoblastenschicht
- Hämorrhagien mit Erythrozyten in den angeschnittenen Dentinkanälen

- veränderte Pulpadurchblutung und Hyperämie durch eine signifikante Änderung des Querschnitts der Pulpaarteriolen nach der Kronenpräparation (38).

- Blutungen im Pulpagewebe

- Nekrotisierung umschriebener Gewebsbezirke

Als Folge dieser Veränderungen können bei schwerer Schädigung des Markorgans sekundäre Veränderungen der Pulpa auftreten:

(6,10,31,43,51,57,58,69)

- hydropische Entartungen der Pulpa, Hohlräumen mit Gewebsflüssigkeit, die auch als Pseudozysten, blow-outs oder varicosity formations bezeichnet werden

- Ausbildung von Granulationsgewebe

- Rundzellinfiltrate

- Verbreiterung des Prädentinsaums

- Abszeßbildungen und Nekrosen

- nicht am Ort der Reizwirkung liegende Pulpagewebsveränderungen im Sinne eines contre-coup Phänomens, die auch rebound response genannt werden.

Einige dieser histologischen Veränderungen wie blow-out oder rebound response werden dabei von Wissenschaftlern (31,43) auch als Artefakte durch das Fixieren oder Veränderungen im Rahmen des physiologischen Spielraums angesehen.

Neben dieser Einteilung gelang es vielen Autoren, einzelne Zellphänomene und Schweregrade der Pulpaschädigungen Antriebsart, Drehzahl und Kühlmittel ihrer Schleifexperimente zuzuordnen. Die Ergebnisse waren jedoch keineswegs einheitlich, und die Beurteilung pathologischer Pulpaveränderungen nach verschiedenartiger Kavitätenpräparation bereitet insofern erhebliche Schwierigkeiten, da bereits bei der histologischen Befundaufnahme "klinisch gesunder" Zähne oft starke Abweichungen von der normalen Pulpastruktur festzustellen sind (43,51,64).

Ein entscheidender Durchbruch gelang ZACH und COHEN (71) 1965, als sie in vivo am Macaca Rhesus-Affen bestimmte Erhöhungen der Temperatur im Pulpakavum histologischen Veränderungen im Zellbild der Pulpa und Pulpaschädigungen zuordnen konnten. Sie stellten erstmals den Zusammenhang von zugeführter Hitze und Pulpareaktion dar und machten die Wärmeentwicklung als hauptsächlichen schmerzauslösenden und pulpaschädigenden Faktor verantwortlich. Übergeordneten mechanischen Effekten der Zahnpräparation und anderen Einflüssen maßen sie geringere Bedeutung bei. So konnten sie bei einer Erhöhung der Pulpatemperatur um $2,2^{\circ}\text{C}$ durch einen von außen am unversehrten Zahn zugeführten Wärmereiz minimale intrapulpale Veränderungen feststellen. Bei Temperaturerhöhungen in der Pulpa um bis zu $5,5^{\circ}\text{C}$ waren bereits ausgedehnte primäre Pulpaveränderungen zu erkennen, die in einigen Fällen schon zu Zelluntergang und Nekrose führten. Ab einer Erhöhung um $11,0^{\circ}\text{C}$ waren bereits mehr als 60% der Zähne nicht mehr in der Lage durch Reparationsmaßnahmen dem drohenden Zelltod zu entgehen.

2.1.3 Die physiologische Grenztemperatur

Es gibt eine physiologische Grenztemperatur bzw. einen physiologischen Spielraum, dessen Temperaturüberschreitung zu irreversibler Pulpaschädigung oder Pulpanekrosen führt. Bei ZACH und COHEN (71) bewegt sich dieser Wert mit einer relativen Temperaturerhöhung von $5,5 - 11,0^{\circ}\text{C}$ zwischen $42,5$ und $48,0^{\circ}\text{C}$. SCHUCHARD (58) erkennt einen ähnlichen physiologischen Spielraum, während SCHUBERT (56) schon bei $41,5^{\circ}\text{C}$ eine Zellschädigung mit Gefahr der Zellnekrose beschreibt. WALLACE et al. (67) sehen bereits bei einer Pulpatemperaturerhöhung um $3,0^{\circ}\text{C}$ also bei $40,0^{\circ}\text{C}$ starke Gefahren für eine irreversible Schädigung der Zahnpulpa.

Auch über eine Messung der Blutzirkulation kann eine physiologische Temperaturgrenze bestimmt werden, die zum sicheren Zelluntergang führt. So beschreiben POHTO und SCHEININ (49) einen Stillstand der Blutzirkulation mit Stase und Thrombose bei Temperaturen im Pulpakavum von $46,0 - 50,0^{\circ}\text{C}$, die in Folge zur Pulpanekrose führen. GANGLER (14) stellt in seiner Arbeit über das Verhalten der Blutzirkulation der Pulpa auf thermische Reize ebenfalls fest, daß ein mehrmaliger Dauerreiz von $45,0^{\circ}\text{C}$ zur Kapillarstase und somit zum Pulpatod führt.

SAUERWEIN (53), NENTWIG (47) und das Internationale Institut für zahnärztliche Praxisführung (24) sehen eine ernsthafte Gefährdung für die Vitalerhaltung des Zahnes erst bei einer biologischen Grenztemperatur von $56,0^{\circ}\text{C}$, da bei diesem Wert die Tomesfasern in den Dentinkanälen und dann die Zell- und Faserelemente der Pulpa der Eiweißkoagulation unterliegen. Dieser Wert erscheint ebenso wie HOFMANN'S (20) Temperaturgrenze von $50,0^{\circ}\text{C}$ im Pulpakavum sehr hoch bewertet.

Zusammenfassend läßt sich feststellen:

Eine kritische Temperatur, die zur zwingenden Schädigung der Zahnpulpa führt, wurde noch nicht ermittelt. Daher gehen wir in der vorliegenden Arbeit wie LAUER (34) davon aus, daß sie $41,0 - 42,0^{\circ} \text{C}$ beträgt, d.h. daß bei Temperaturen oberhalb $42,0^{\circ} \text{C}$ Zellschädigungen eintreten können. Allerdings bestehen auch schon bei Temperaturen unterhalb $42,0^{\circ} \text{C}$ und entsprechend längerer Exposition die Möglichkeit irreversibler Zellschädigungen.

2.1.4 Klinische Folgen des Präparationstraumas

Neue Statistiken weisen eine Zunahme von Pulpaschädigungen nach der Überkronung auf. Läßt man vergleichsweise alte Zahlen aufgrund nicht mehr zu vergleichender Arbeitsweisen in der zahnärztlichen Praxis außer Betracht, so ist selbst in den letzten Jahren ein Anstieg des Vitalitätsverlustes nach zahnärztlicher Präparation zu verzeichnen. 1979 berichteten KERSCHBAUM und VOB (25), daß 10 Jahre nach der Überkronung 9,1% der Zähne nicht mehr vital reagierten. Weitere 5,5% waren nicht eindeutig zu beurteilen. 1981 registrieren sie 10 Jahre nach der Überkronung einen Vitalitätsverlust bei 15% der überkronten Zähne. Diese Ergebnisse decken sich mit Erhebungen des Internationalen Instituts für Zahnärztliche Praxisführung in Koblenz (24), welches 1983 den Vitalitätsverlust nach Präparationstrauma mit 10-12% bei zunehmender Tendenz veröffentlicht. Diese Zahlen basieren auf aktuellen Studien der Bundesrepublik Deutschland und der USA. KLÖTZER (31) macht für diese Zunahme die immer weiter verbreitete Hohlkehl- und Stufenpräparation verantwortlich, die gegenüber der Tangentialpräparation eine größere Abtragung von Zahnhartsubstanzen fordert. Diese Aussage deckt sich mit Beobachtungen von TAKAHASHI (66), der nach prothetischer Versorgung eine starke Beeinflussung der Pulpatemperatur

durch heiße und kalte Reize (15,0 - 55,0° C) auf den versorgten Zahn feststellt. Diese hängt vor allem von der Restdentinstärke, aber auch von Dicke und Art des verwendeten Zementes ab. Weitere Forderungen zielen darauf ab, neben der substanzschonenden Zahnpräparation und einer adäquaten Nachbehandlung in erster Linie die Entstehung von Wärme beim Schleifprozess möglichst gering zu halten. Sie lassen sich wie folgt zusammenfassen (25,47,50):

- ein ausreichender Sicherheitsabstand zur Zahnpulpa ist einzuhalten.
- es soll vorwiegend intermittierend gearbeitet werden, um eine Wärmeverteilung auf Werkstück und Werkzeug zu ermöglichen.
- die Präparation soll nur mit einem intensiven Spray zur ausreichenden Kühlung erfolgen. Die Berührungsstelle Instrument-Zahn muß vom Spraystrahl ständig maximal und ungehindert erreicht werden können.
- es dürfen nur geringe Vorschubkräfte zur Anwendung kommen.
- der Zahnarzt soll keine stumpfen und abgenutzten Schleifkörper verwenden.
- eine übermäßige Dehydrierung und Entfettung des präparierten Stumpfes ist zu vermeiden.
- Abdruckmaterial und Provisorium sollen keine weiteren thermischen Belastungen für den Zahn darstellen

2.2 Thermische Grundlagen des Schleifprozesses

2.2.1 Die Wärmeentwicklung bei der Präparation

Die Arbeit, die beim Schleifprozeß verrichtet wird, gliedert sich in verschiedene Anteile auf. Sie erstreckt sich nicht allein auf die Zerspanung der Zahnhartsubstanzen, die sogenannte Trennarbeitsleistung, sondern auch auf verschiedene unerwünschte Umwandlungsformen. Hierbei ist vor allem die Umwandlung der kinetischen Energie des rotierenden Instrumentes in Reibungs- oder Arbeitswärme zu nennen. Diese Arbeitswärme entsteht dabei an der Berührungsstelle von Schleifkörper und Zahn. Daraus ergeben sich vier Wege der möglichen Wärmeabgabe (50):

- 1) Wärmeabfuhr in erheblichem Maß durch heiße Materialspläne
- 2) Abstrahlung von Wärme in das umgebende Medium
- 3) Wärme wird vom Werkstück (Zahn) aufgenommen
- 4) Wärme wird vom Werkzeug (Schleifkörper) aufgenommen

Über diese vier Wege der Wärmeabgabe besteht auch die Möglichkeit der Wärmeerzeugung entgegenzuwirken und den Temperaturreiz auf den Zahn möglichst gering zu halten.

Zu 1): Beschleunigter Abtransport heißen Materials¹ beim Vordringen des Schleifers führt nur zu relativ geringer Wärmeentwicklung durch die Art des Zerspanungsprozesses (10). Bei höchsten Geschwindigkeiten kann dabei sogar eine teilweise Verdampfung des Materials erfolgen. Die Verdampfungswärme wird dem Zahn direkt entzogen. Langanhaltendes Schleifen auf einer Stelle des Zahnes ergibt eine ungenügende Eliminierung des Schleifstaubes durch zu tiefes Eindringen des Schleifkörpers in das Material. Die Wärmeentwicklung an der Schleifstelle wird gesteigert (49).

Zu 2): Wasser besitzt eine vierfach größere spezifische Wärme und etwa zwanzigfach höhere spezifische Wärmeleitfähigkeit als Luft (21). Verwendet man zur Kühlung einen Wasserspray erreicht man auf besonders günstigem Weg eine Wärmeabfuhr.

Zu 3 und 4): Die Wärmeverteilung auf Werkzeug und Werkstück hängt zum einen von deren Größe und zum anderen von ihrer spezifischen Wärmeleitfähigkeit ab. Sie beträgt für Zahnschmelz und Dentin 0,649 bzw. 0,422 Watt/m K im Vergleich zu 62,800 Watt/m K bei Eisen (20,52). Das bedeutet, daß Zahnschmelz und Dentin gegenüber Eisen schlechte Wärmeleiter, also gute Wärmeisolatoren sind. Der Schleifkörper wird dieser Aussage zufolge bei der Bearbeitung stärker erhitzt als der Zahn. Die vergleichsweise hohe spezifische Wärme von Zahnschmelz und Dentin ermöglicht aber insgesamt eine sehr große Aufnahme und Speicherung von Wärme, falls diese nicht anderweitig abgeführt wird.

Weiterhin wird die Wärmeverteilung auf Werkstück und Werkzeug davon beeinflusst, welches von beiden Teilen feststeht und welches bewegt wird. Für den zahnärztlichen Schleifprozess trifft der ungünstigere Fall zu, daß ein rotierendes Werkzeug (Schleifkörper) mit einer bestimmten Vorschubkraft gegen ein stillstehendes Werkstück (Zahn) gedrückt wird. Der

Berührungspunkt als Entstehungsort der Arbeitswärme bleibt dabei für den Zahn gleich, während er sich für den Schleifkörper ständig an dessen Umfang bewegt. Der Bohrer oder Diamantschleifer sollte demnach ständig an der zu bearbeitenden Stelle entlanggeführt werden, oder zumindest nur intermittierend an einem Ort eingesetzt werden. Der Grad der Wärmeentwicklung entspricht dem Wirkungsgrad des Werkzeuges. Die pro Zeiteinheit produzierte Wärmemenge hängt dabei in gleicher Weise wie die verrichtete Schleifarbeit proportional von der Vorschubkraft und der Schnittgeschwindigkeit ab. Zur richtigen Beurteilung der Arbeitsleistung und des Wirkungsgrades eines Schleifkörpers ist es also nötig, von der Umdrehungszahl und dem Radius auszugehen (2,50). Der Einfluß auf diese Größen ist jedoch sehr beschränkt. Große Schleifinstrumente sind in ihrem Anwendungsbereich begrenzt und erhöhen das Unfallrisiko durch die starken Zentrifugalkräfte, die in hoch- und höchsttourigen Schleifbereichen auftreten. Die Empfehlung, Schleifkörper mit einem maximalen Durchmesser von 2mm zu verwenden (2,47), erfüllt sich deshalb von selbst. Zur Umdrehungszahl bleibt zu sagen, daß sie ebenso wie die Vorschubkraft in einem Bereich gewählt werden muß, der ein vernünftiges Verhältnis von Schleifarbeit zu entstehender Arbeitswärme garantiert. Zu große Vorschubkräfte überfordern die Schneidleistung des Instrumentes. Es verschmiert, und hohe Reibungswärme entsteht. Ebenso bringt ab einer gewissen Grenze eine Erhöhung der Drehzahl keine Leistungssteigerung mehr, sondern läßt den Wirkungsgrad zu Gunsten der produzierten Wärmemenge sinken.

2.2.2 Bisherige Temperaturmessungen an den Zahnhartsubstanzen und im Pulpakavum

Es müssen zwei verschiedene Verfahren zur Messung von Temperaturänderungen während der Zahnpräparation unterschieden werden. Die Temperaturmessung in der Zahnpulpa und in den Zahnhartsubstanzen, zum Beispiel dem Dentin (Abb.1).

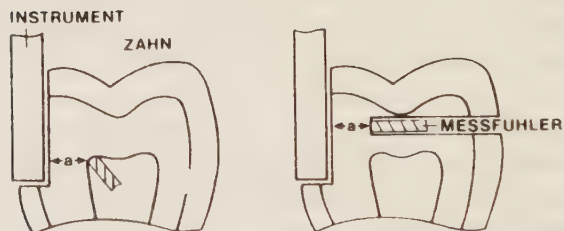


Abbildung 1: a) Intrapulpale Messung b) Messung im Dentin

Entscheidend ist dabei der unterschiedliche Ort, an dem die schädigende Wirkung des Temperatureinflusses untersucht werden soll. Ausgehend von den beobachteten Pulpaveränderungen und ihrer Korrelation zu Temperaturerhöhungen im Pulpakavum, besitzen besonders intrapulpale thermische Aufzeichnungen einen hohen Aussagewert. Angaben über die physiologische Grenztemperatur werden daher nahezu ausschließlich aufgrund von Temperaturbeobachtungen in der

Pulpa gemacht (14,20,24,47,49,56,58,67,71). Ebenso ist diesem Verfahren für Temperaturmessungen, bei Schleifversuchen unter Verwendung verschiedener Antriebseinheiten und Kühlsystemen eine größere Bedeutung beizumessen (2,4,10,11,19,20,32,55,56,64,68,70). Der Versuchsaufbau und die Laborbedingungen der in vitro und in vivo durchgeführten Experimente differieren dabei jedoch oft stark voneinander. Im folgenden sollen an Hand einer Übersicht die wichtigsten bisherigen Temperaturmessungen dargestellt werden.

Bei Temperaturmessungen an der Schnittfläche des Schleifkörpers mißt HOFMANN (21) Temperaturen bis zu 290°C . In Dentinbrandmarken erreicht er Spitzenwerte bis 600°C . Er verwendet dabei eine ungekühlte Luftturbine und arbeitet bei einer Vorschubkraft von 0,2-0,6 N. Seine Versuche finden unter Laborbedingungen statt.

LANGELAND (33) stellt bei Schleifversuchen Oberflächentemperaturen von $700 - 900^{\circ}\text{C}$ fest. Seine Ergebnisse stützen sich auf histologische Methoden.

Wesentlich genauere und sehr praxisnahe Werte beschreibt MARTIN (45) bei Temperaturmessungen an vorgewärmten Dentinblättchen von $34,0^{\circ}\text{C}$. Unter Verwendung eines optimalen Kühlsystems und einer Vorschubkraft von jeweils 1,5 N beschreibt er Schleifversuche mit Schnellaufwinkelstück und Turbine. Bei einer Annäherung an das Thermoelement von 0,2 mm registriert er Temperaturmaxima im Bereich der Spitze verschiedener diamantierter Schleifkörper. Sie betragen im Mittel $4,65^{\circ}\text{C}$ bei der Arbeit mit dem Schnellaufwinkelstück und $6,95^{\circ}\text{C}$ bei Verwendung der Turbine. Spitzenwerte von $8,0^{\circ}\text{C}$ (Winkelstück) bzw. $11,0^{\circ}\text{C}$ (Turbine) werden dabei erreicht.

Einen Zusammenhang zwischen Temperaturmessungen an den Zahnhartsubstanzen und im Pulpakavum versuchen LLOYD et al. (40) herzustellen. Sie messen mit zwei Thermoelementen an der Schmelz-Dentin-Grenze und im Pulpakavum korrelierende Temperaturpaare. Sie erzielen an der Schmelz-Dentin-Grenze Temperaturerhöhungen bis zu 280°C , die im Pulpakavum ein Ansteigen der Temperatur um $40,0^{\circ}\text{C}$ bewirken. Fügen sie beim Schleifvorgang ein Luft-Wasser Kühlgemisch hinzu, sinken die Meßergebnisse an den Zahnhartsubstanzen auf eine relative Erhöhung von 100°C und bei Verwendung von innen-gekühlten Hohlbohrern sogar auf nur $25,0^{\circ}\text{C}$. Die entsprechende Temperaturerhöhung im Pulpakavum liegt dann bei $5,0^{\circ}\text{C}$.

POLMAN-MOOY (50) erreicht bei Schleifversuchen mit Winkelstück und Turbine unter Einhaltung eines Sicherheitsabstands von 0,5 mm zur Zahnpulpa und Verwendung eines Kühleisens am Pulpdach maximale Temperaturerhöhungen von $2,5 - 5,5^{\circ}\text{C}$. Bis zum Erreichen des Pulpakavums und dem Freilegen des Thermoelementes lassen sich diese Werte bei steigender Vorschubkraft auf $8,0 - 10,7^{\circ}\text{C}$ bei Turbinenpräparation und auf $8,0 - 11,0^{\circ}\text{C}$ mit dem Winkelstück steigern. Noch drastischer sieht das Ergebnis bei der trockenen Zahnpräparation aus. Es ergeben sich Temperaturerhöhungen von $18,8 - 30,0^{\circ}\text{C}$ (Turbine) bzw. $39,4 - 52,6^{\circ}\text{C}$ (Winkelstück).

In einer Ergänzungsarbeit zu POLMAN-MOOY (50) stellt FECHNER (11) fest, daß bei ausreichender Kühlung eine Temperatursteigerung von $10,0^{\circ}\text{C}$ im Pulpakavum nicht erreicht wird. Sie verwendet bei ihren Schleifversuchen Hartmetallfräser und arbeitet mit einem reichhaltigen Sortiment von Antriebs-sätzen aus dem hoch- und höchsttourigen Geschwindigkeitsbereich.

HOFMANN (20) beschleift frisch extrahierte Zähne okklusal bis zur Schmelz-Dentin-Grenze und an den Seitenflächen entsprechend einer Kronenpräparation. Er arbeitet bei Zimmer-

temperatur unter ständigem Kontakt zum Zahn. Bei einer Vorschubkraft von 1 N ergeben sich für den Mikromotor und ein Diamantschleifrad je nach Zahngruppe - Molar, Eck- oder Schneidezahn - ohne Kühlmittel interpulpale Temperaturerhöhungen um 7,7 , 13,9 und 25,0° C. Wird eine Wasserkühlung von mehr als 30 ccm/min verwendet, findet in der Pulpa keine Temperaturerhöhung mehr statt. Mit einer luftgeköhlten Turbine registriert HOFMANN bei der Freilegung des Pulpahorns Spitzenwerte von 2,5 - 3,0° C.

WALTER und LEINWEBER (68) messen ebenso bei Laborbedingungen an frisch extrahierten Zähnen. Die Vorschubkraft von 0,3 - 0,5 N bei den Experimenten mit der Luftturbine kontrollieren sie über ein hörbares Absinken der Tourenzahl. Durch Benützung eines geeigneten Kùhlsprays kann bei der Präparation ein Temperaturabfall von 1,0 - 3,0° C am Pulpadach beobachtet werden. Ungekùhlt ergeben sich Erhöhungen der Temperatur in der Pulpa bis zu 15,0° C. Die entsprechenden Werte für den Mikromotor liegen mit Kùhlspray bei 5,0° C und für die ungekùhlte Präparation bei 22,0° C.

WITTROCK et al. (70) erzielen bei Raumtemperatur von 20,0° C für die Turbinenpräparation bei geringer Vorschubkraft wesentlich höhere Werte. Die Verwendung eines Kühlmittels führt zu einer durchschnittlichen Temperatursteigerung im Pulpakavum von 2,76° C. Die trockene Präparation ergibt je nach Abstand zur Zahnpulpa Werte von 19,17 - 29,38° C.

Gegenüber den bisher genannten Temperaturmessungen berücksichtigen BRATSCHKO und PLISCHKA (2) die Wärmeabgabe an das Parodontium, indem sie frisch extrahierte Zähne in Kunststoff einbetten. Ein Kühlwasserspray von 50 ccm/min und die Anwendung einer Vorschubkraft von 0,4 N führen sie mit dem Schnellaufwinkelstück bei 120 000 U/min nach 60 Sekunden je nach Art des verwendeten Diamanten zu einer maximalen intrapulpalen Temperatursteigerung von 5,3 - 8,9° C.

Bei KLOS und ROTTKE (32) befindet sich der Zahn während der Präparation in physiologischer Kochsalzlösung von $36,0^{\circ}\text{C}$. Jedoch vermindern sie die Zahnschubstanz, indem sie zur Aufnahme eines kugelförmigen Thermoelementes in der Zahnpulpa von der Wurzelbifurkation aus einen breiten Zugang zum Pulpadach legen. In Abhängigkeit von der Vorschubkraft erreichen sie mit einer Turbine und entsprechender Luftkühlung in der Pulpa Temperaturen von $54,0^{\circ}\text{C}$. Dies bedeutet eine relative Temperaturerhöhung von $17,0^{\circ}\text{C}$.

HENNING und PRZETAK (19) entwickelten für ihre Temperaturmessungen den sogenannten Prep-Trainer. Extrahierte Zähne werden durch eine Gummimanschette gehalten und in Acrylat eingebettet, wodurch ebenfalls die Wärmeübertragung auf das Stützgewebe simuliert werden soll. Bezugspunkt ist dabei jedoch die Raumtemperatur. Spezielle Angaben zum Antriebsgerät werden nicht gemacht. Die in der Pulpa des Zahnes gemessene Temperaturerhöhung beträgt abhängig vom Abstand des Schleifkörpers zur Pulpa $6,0 - 10,0^{\circ}\text{C}$ bei Benutzung eines Kühlsprays, $7,5 - 20,8^{\circ}\text{C}$ bei Luftkühlung und $9,5 - 35,0^{\circ}\text{C}$ bei trockener Präparation.

SCHÖLER (54) verwendet den Prep-Trainer um luft- und kugelgelagerte Turbinen zu vergleichen. Er kommt dabei auf vergleichsweise geringe Unterschiede bei der Temperaturmessung im Pulpakavum und beziffert seine Ergebnisse in der gleichen Größenordnung wie HENNING und PRZETAK (19). Eine Temperaturerhöhung von $10,0 - 13,0^{\circ}\text{C}$ bei alleiniger Luftkühlung und $6,0 - 10,0^{\circ}\text{C}$ bei zusätzlichem Wasserspray.

EIFINGER und SCHULZ (10) verwenden bei ihren Experimenten ebenfalls den Prep-Trainer, den sie durch eine spezielle Vorrichtung zur ständigen Kontrolle der Vorschubkräfte ergänzen. Sie registrieren mit einer Turbine und Wasserkühlung einen initialen Temperaturabfall von $2,0^{\circ}\text{C}$ am Pulpadach, den sie mit dem Entzug von Verdunstungswärme erklären.

Eine steigende Vorschubkraft von 0,5 - 2,2 N kann bei fortschreitender Präparation allerdings auch zu Temperaturerhöhungen bis 6,5° C führen. Mit dem Mikromotor lassen sich bei 2,0 N Vorschubkraft dieselben Erscheinungen in abgeschwächter Form erzielen. Dabei ist eine Temperaturerhöhung bis zu 4,0° C möglich. Bei speziellen Präparationstechniken, wie zum Beispiel dem obsoleten Scheibenschnitt oder der Stiftverankerung, werden Temperaturerhöhungen bis maximal 13,0 - 14,0° C beschrieben.

SCHUBERT (56) beschreibt einen in vivo Versuch, bei dem er mit Hilfe eines Lichtstrichgalvanometers Pulpatemperaturen während Schleifarbeiten an Hundezähnen mißt. Bei hoher Drehzahl erfolgt eine maximale Temperatursteigerung von 6,0 - 8,5° C bei Luftkühlung und 2,0 - 3,0° C mit Wasserkühlung. Genaue Angaben über Vorschubkraft, Drehzahl oder Abstand zur Zahnpulpa werden dabei nicht gemacht.

STUBEN und HOPPE (64) führen zur Vervollkommnung der Versuchsbedingungen in-vivo-Schleifexperimente am menschlichen Zahn durch. Sie verwenden dazu unversehrte Prämolaren, die aus kieferorthopädischen Gründen zu entfernen sind. Dabei stellen sie eine Abweichung von der Eigentemperatur je nach verwendetem Schleifkörper und Kühlart fest. Die in der Zahnpulpa gemessenen Werte reichen dabei von einem Temperaturabfall um 6,0° C bis zu einer Temperaturerhöhung um 8,0° C. Bei ausreichendem Wasserspray ist jedoch selbst im höchsttourigen Bereich am Pulpadach eher ein Temperaturabfall als ein Temperaturanstieg zu verzeichnen. Exakte Angaben über Vorschubkraft und andere Parameter können auch bei dieser Temperaturmessung nicht gemacht werden.

2.2.3 Umgebungsbedingungen und ihr thermischer Einfluß auf den Schleifprozess

Die Wärmeentwicklung des Schleifprozesses scheint nicht nur von Faktoren wie Umdrehungszahl, Vorschubkraft, Restdentinstärke, Kühlwassertemperatur und -menge abhängig zu sein. Schon 1963 beschreibt FUHR (13) einen völlig anderen Temperaturverlauf bei Schleifversuchen an Zähnen, die auf 34,0° C Oberflächentemperatur zur Simulierung der Mundhöhlenbedingungen erwärmt sind, als bei vergleichbaren Versuchen, die bei Zimmertemperatur durchgeführt werden. Der alleinige Kühlmiteleinfluß auf die erwärmten Zähne verursacht durchwegs einen Temperaturabfall im Gegensatz zu den Zähnen, die Zimmertemperatur aufweisen, und bei denen jeglicher Einfluß von Luft, Spray oder Wasser schon zu einer Erhöhung der Pulpatemperatur führt. Interessant ist dabei die Beobachtung, daß der Einfluß des Kühlmittels bei den auf 34,0° C Mundhöhlentemperatur erwärmten Zähnen zu einer Temperatursenkung führt, die in jedem Fall größer ist als der Temperaturanstieg der nur auf Zimmertemperatur gehaltenen Zähne während eines schonenden Präparationsvorganges mit ausreichend Kühlmittel. Die Ergebnisse der Schleifversuche unter Laborbedingungen mit einer maximalen Pulpatemperaturerhöhung von 10,0° C (Fissurenbohrer, 0,5 N Vorschubkraft, Luft- und Wasserkühlung) bis hin zu Spitzenwerten von 111,5° C bei unsachgemäßer Turbinenpräparation (Fissurenbohrer, 1,0 N Vorschubkraft, nur Luftkühlung) können damit nicht mehr beobachtet werden. Unter vorschriftsmäßiger Präparation ist bei verschiedenen Geräten keine von der Mundhöhlentemperatur wesentlich abweichende Änderung zu messen. Erst bei Steigerungen bis zur Anwendung einer kontinuierlichen Vorschubkraft von 1,8 N sind Temperaturerhöhungen im Pulpakavum von 1,0 - 7,0° C über der eingestellten Mundhöhlentemperatur von 34,0° C zu erreichen. Bei den Versuchen, die zu einer Temperaturerhöhung im Pulpakavum führen, ist nach FUHR (13) sowohl die Art und Menge als auch die Temperatur des Kühlmittels in

Zusammenhang mit der Drehzahl von größerer Bedeutung als bei den Versuchen, die zu einem Temperaturabfall führen.

STUBEN und HOPPE (63) weisen bei ihren Untersuchungen ebenfalls darauf hin, daß die Situation in vivo nicht ausreichend mit Schleifversuchen bei Zimmertemperatur wiederzugeben ist. "Wirkt das Kühlsystem der Luftturbinen auf die Kavitätswände ein, sinkt die Temperatur am Pulpdach eines im Munde befindlichen Zahnes deutlich ab. Unter gleichen Bedingungen ist an extrahierten Zähnen bei Zimmertemperatur mit einem Temperaturanstieg im Dentin zu rechnen (63)."

Vielfach versuchten Autoren bei ihren in vitro Experimenten die Umgebungsbedingungen zu berücksichtigen, doch gelang dies nur teilweise und unvollständig. MARTIN (45) arbeitet mit vorgewärmten Dentinprüfkörpern auf $34,0^{\circ}\text{C}$, wobei genormte Prüfkörper die Situation des ganzen Zahnes und seine Wärmeableitung auf Wurzel und umgebendes Stützgewebe nicht ausreichend simulieren können.

BRATSCHKO und PLISCHKA (2) betten bei ihren Versuchen die Zähne in Acrylat ein, um der Wärmeableitung durch das Parodontium gerecht zu werden, doch arbeiten sie nach wie vor unter Laborbedingungen bei Zimmertemperatur.

Dasselbe gilt für den Prep-Trainer von HENNING und PRZETAK (13), der auch bei den Versuchen SCHÖLERS (54) und EIFINGERS und SCHULZES (10) Verwendung findet. Frisch extrahierte Zähne werden in Acrylat eingebettet und bei Zimmertemperatur beschliffen. Die Übertragung der Ergebnisse auf Raumtemperatur geschieht durch Senkung der Temperatur von Wasser und Druckluft um die Differenz Körper- zu Raumtemperatur.

KLOS und ROTTKE (32) betten ihre Zähne während der Schleifexperimente in einem Wasserbad mit physiologischer Kochsalzlösung von $36,0^{\circ}\text{C}$ ein. Sie berücksichtigen damit sowohl die Wärmeableitung über die umgebenden Stützgewebe als auch die Eigentemperatur des Zahnes. Die Einbettung in der NaCl-Lösung erscheint schon deshalb sehr gelungen, da KLÖTZER (30) feststellt, daß an trockenen extrahierten Zähnen die Wärmeentwicklung um 20% höher bewertet werden muß.

Diese Beobachtungen können eine Erklärung für die Vielfalt an Ergebnissen sein, die von Temperaturmessungen bei Schleifversuchen vorliegen. Neben der Wärmeableitung über das den Zahn umgebende Stützgewebe - das Parodontium - , ist dabei die richtige Einstellung der thermischen Umgebungsbedingungen von Bedeutung, da der Unterschied von Zimmertemperatur bei Laborbedingungen ($20,0 - 22,0^{\circ}\text{C}$) bis zur Mundhöhlen- ($34,0^{\circ}\text{C}$) oder Körpertemperatur ($37,0^{\circ}\text{C}$) immerhin $12,0 - 17,0^{\circ}\text{C}$ beträgt. Entscheidend ist dabei auch die Tatsache, daß bei Laborbedingungen die Arbeitstemperatur niedriger ist, als die Temperatur des Kühlmittels, während bei der Situation in vivo die Temperatur des biologischen Systems meist über der des Kühlmittels liegt. In - vivo - Versuche berücksichtigen die Umgebungsbedingungen daher in optimaler Weise, doch lassen sie oft keine komplizierten Versuchsaufbauten zu, die es ermöglichen, andere Versuchsparameter ausreichend zu bestimmen.

2.3 Gerätetechnische Grundlagen

2.3.1 Grundlegender Vergleich der Antriebssysteme zahnärztliche Turbine und Mikromotor

Mit Einführung der zahnärztlichen Turbine 1956 konnten erstmals hohe Schleifleistungen erzielt werden. Die Turbine wird durch Luft angetrieben und erreicht bei luftgelagerten Ausführungen Drehzahlbereiche bis zu 450 000 U/min im Leerlauf. Die Drehzahl während der Präparation ist generell nicht definiert und hängt stark von der angewendeten Vorschubkraft ab. Durch Kugellagerung und eine optimierte Rotorform (38) konnte die Durchzugskraft der Turbinen um das zwei- bis dreifache erhöht werden. Mit dieser Entwicklung zu den sogenannten Torque-Turbinen ist auch bei den Turbinen das "Kontaktschleifen" möglich.

Der Mikromotor fand seine Praxisreife erst 1966, 10 Jahre nach Vorstellung der ersten Turbine. Er wird durch Gleich- oder Wechselspannung angetrieben. Sein Arbeitsbereich liegt bei einer Drehzahl von 4 000 - 40 000 U/min, der durch Veränderung der Spannung beliebig gesteuert werden kann. Durch eine elektronische Schaltung wird dem Motor proportional zur Belastung Strom zugeführt (39). Das sogenannte Kontaktschleifen - das heißt ein fortwährendes Schleifen bei hohen Vorschubkräften von 2-3 N - ist im gesamten Drehzahlbereich möglich. Untersetzungs- bzw. Übersetzungswinkelstücke erweitern den Drehzahlbereich auf Werte von 600 - 160 000 U/min.

Im Vergleich stellt die Turbine das einfachere und preiswertere Antriebssystem dar, mit dem ein rasches und vibrationsarmes Abtragen von Zahnhartsubstanzen möglich ist. Sie besticht dabei durch eine große Handlichkeit und geringes Gewicht. Der Mikromotor hingegen hat den Vorteil seiner hohen Leistungsfähigkeit von bis zu 30 Watt bei

konstanter Drehzahl mit hoher Durchzugskraft. Rechts- und Linkslauf sind möglich. Mit verschiedenen Hand- und Winkelstücken lassen sich alle spezifischen Arbeiten des zahnärztlichen Bereiches ausführen.

2.3.2 Die unterschiedliche Bewertung des Präparationstraumas von Turbine und Mikromotor

Es gibt viele Faktoren, die Ansatzpunkt zu vergleichenden Untersuchungen beim zahnärztlichen Schleifprozess sein können. Mit der Einführung hoch- und höchsttouriger Antriebssysteme, die zu starker Wärmeentwicklung führen, wurde häufig der Einfluß von Luft- und Wasserkühlmethoden im Vergleich zu ungekühlten Schleifverfahren untersucht. Nachdem das Kühlwasserspray aus heutiger Sicht eine *conditio sine qua non* darstellt, haben sich die Versuche auf sehr feine Parameter, wie Sprayanordnung (29), Kühlwassermenge und -temperatur (29,40), sowie Art und Form der verwendeten Schleifkörper (2,12,45,47) konzentriert. Nach wie vor ist jedoch das Interesse an der Drehzahl des Antriebssystems sehr groß, die mit Einführung des Mikromotors ein nahezu unbegrenztes Spektrum erreicht hat. Man unterscheidet dabei zwischen dem hochtourigen Drehzahlbereich des Mikromotors und höchsttourigen Umdrehungszahlen, wie sie nur von der Turbine erreicht werden. Seit der Einführung von Schnellaufübersetzungswinkelstücken für den Mikromotor sowie kugelgelagerten Torque-Turbinen gestalten sich dabei die Grenzen nahezu fließend.

Ausgehend vom Präparationstrauma für den Zahn bestehen verschiedene Ansatzpunkte, die eine vergleichende Beurteilung zulassen. Histologische Ergebnisse, Ultraschallwirkungen, eine mögliche traumatische Schädigung sowie die Wärmeentwicklung beim Schleifvorgang können dabei als Entscheidungskriterium dienen.

EICHNER (8) faßt schon 1960 in einer Arbeit sehr unterschiedliche Ergebnisse zusammen, die auf der Beobachtung von Pulpaveränderungen beruhen. Während MARSLAND und SKOVELTON (44) nach höheren Geschwindigkeiten größere Pulpaveränderungen feststellen, können SWERDLOFF und STANLEY (65) weit weniger histologische Veränderungen registrieren.

Auf histologischen Beobachtungen beruhen auch die Ergebnisse von RATEITSCHAK et al. (51), die im Vergleich von Airtor und elektrischem Antrieb (20 000 U/min) bei der Turbine etwas ausgeprägtere Pulpaveränderungen feststellen.

Wenige Unterschiede beider Präparationsverfahren erkennen WALTHER et al. (69), als sie die histologische Sofortreaktion der Zahnpulpa untersuchen. Die einzigen signifikanten Auswirkungen im Vergleich beider Antriebssysteme stellen für sie das häufigere Auftreten von Blutungen bei der Turbinenpräparation und die vermehrte Hydropsbildung beim Arbeiten mit dem Mikromotor dar. Eine spezifische Aussage über das Risiko für die Zahnpulpa treffen sie jedoch nicht.

STUBEN und HOPPE (64) können lediglich bei den sekundären Pulpaveränderungen verstärkte Erscheinungen nach Präparation mit elektrischen Antriebseinheiten erkennen. Sie sehen den Grund für die jeweiligen Gewebsreaktionen in einer Störung der Isoionie und Isotonie der Gewebsflüssigkeiten, die bei der Turbine durch die Antriebsluft und beim Mikromotor durch die entstehende Wärme erfolgt.

HARNDT (18) weist eine Ultraschallwirkung von höchsttourig arbeitenden Turbinen nach und erklärt damit die zunehmende Anzahl von Pulpanekrosen nach umfangreicher Präparation. Mit Einführung des Mikromotors betrachtet er die Turbine als überholt, da oberhalb 100 000 U/min Frequenzen mit einem Schalldruck entstehen, von dem biologische Wirkungen angenommen werden können. Seine Empfehlung lautet, mit Drehzahlen unter 100 000 U/min und kleinen Instrumenten zu arbeiten, um die Übertragung von hochfrequenten Schwingungen so gering wie möglich zu halten.

MUSIL (46) macht vor allem die mechanische Läsion an den Zahnhartsubstanzen und ihren Einfluß auf Odontoblasten und Pulpagewebe für das iatrogen zugeführte Trauma beim Schleifprozess verantwortlich. Er fordert, pulpanah mit geringer Drehzahl zu arbeiten und stützt sich dabei auf die Ergebnisse KETTERLS (26), der feststellte, daß in unmittelbarer Nähe der Zahnpulpa die Dentinoberfläche zu 40% aus Odontoblastenfortsätzen besteht. Er beruft sich zusätzlich auf Beobachtungen EICHNERS (9), der bei steigender Drehzahl auch einen Anstieg der entstehenden Arbeitswärme registriert.

Im Vergleich der beiden Präparationssysteme stützen sich die meisten Autoren bei ihren Untersuchungen auf die Registrierung der thermischen Verhältnisse durch Temperaturmessungen während des Schleifprozesses.

POLMAN-MOOY (50) kann dabei keine größeren Unterschiede bezüglich der gemessenen Temperaturen bei fachgerechter Anwendung beider Antriebsarten feststellen.

Auch FECHNER (11) registriert keine nennenswert höheren Temperaturen bei der Turbine im Vergleich zum Mikromotor.

Neuere Untersuchungen EIFINGERS und SCHULZES (10) mit dem Prep-Trainer können ebenfalls keine großen Unterschiede aufzeigen. Bei regelrechter Anwendung der Torque-Turbine und des Mikromotors dürften keine thermischen Schädigungen des Markorgans verursacht werden.

HOFFMANN (20) beschreibt beim Schleifen mit dem Airotor eine "Zwangskühlung", die nur zu einer sehr geringen Temperaturerhöhung im Pulpakavum führt. Lediglich Schleifversuche mit einem Winkelstück bei 20 000 - 24 000 U/min führen zu einem relevanten Temperaturanstieg, der jedoch ausbleibt, wenn bei Präparation des Zahnes eine Wassermenge von ca. 30 ml/min zur Kühlung verwendet wird. HOFFMANN macht die Temperaturerhöhung und das Erreichen einer kritischen Temperaturgrenze mehr von Art und somit Größe des beschliffenen Zahnes abhängig als von der Drehzahl des verwendeten Antriebs.

Ebenso gelangt MARTIN (42) bei seiner Arbeit über die Temperaturentwicklung und Schleifleistung von Turbine und Schnellaufwinkelstück in Kombination mit langen Diamantschleifinstrumenten zu unwesentlich höheren Temperaturwerten bei Verwendung der Turbine. Er folgert, daß die durch den Schleifvorgang im Dentin entstehenden Temperaturen nicht von der Art des Antriebes abhängen, sondern von der Verteilung des Spraywassers durch das Spraysystem und damit von der Wirksamkeit und der Qualität der Spraykühlung.

SIMON (60) weist mit Einführung der durchzugsstarken Torque-Turbinen auf eine Indikationsverschiebung zu Gunsten der Turbine hin. Die Präparation mit dem Mikromotor kann zur Anwendung zu hoher Vorschubkräfte führen, die bei steigender Reibungswärme zu einer thermischen Gefahr für die Pulpa werden können. Trotz dieser Stellungnahme für die Turbine, empfiehlt SIMON, pulpanah mit niedriger Drehzahl und vermindertem Druck zu arbeiten.

WALTER und LEINWEBER (68) sehen Vorteile in der Turbinenpräparation, da sie kürzere Präparationszeiten ermöglicht, und im Kühleispray die Wassertröpfchen zerissen werden, so daß es zur Ausbildung einer großen spezifischen Oberfläche des Kühlmediums kommt.

Im Gegensatz dazu argumentiert BLEICHER (1) deutlich für den Mikromotor. Er registriert bei niedrigem Anpreßdruck mit der Turbine eine höhere Wärmeentwicklung als beim Mikromotor mit entsprechend höherem Arbeitsdruck bei größerem Materialabtrag. Mit Hilfe der Elektronen-Spin-Resonanz-Spektroskopie kann er bei der Turbinenpräparation freien Kohlenstoff nachweisen, der bei der Überhitzung des Zahnes gebildet wird und ein Anzeichen für eine Gewebse Nekrose darstellt. Zur Überprüfung dieser Resultate führt BLEICHER Temperaturmessungen am Zahn mit Thermoelementen durch, die wesentlich geringere Temperaturerhöhungen für die Präparation mit Mikromotor und Übersetzungswinkelstück, als bei vergleichenden Arbeiten mit der Turbine ergeben.

2.4 Problemstellung

Technische Neuerungen haben zahnärztliche Antriebssysteme ständig verbessern und weiterentwickeln können. Die Turbine ist dabei in den letzten Jahren von Drehzahl und Durchzugskraft in Bereiche des sogenannten "Kontaktschleifens" vorgedrungen, die bisher den Mikromotoren vorbehalten waren (60). Um eine maßgebende Aussage über hoch- und höchsttourige Präparationsverfahren und ihre thermische Belastung für den Zahn treffen zu können, müssen Temperaturaufzeichnungen im Pulpakavum zum Vergleich der beiden Präparationssysteme durchgeführt werden. Alle Versorgungsgrößen sollten optimal gewählt und konstant gehalten werden, um die Versuche in reproduzierbarer Weise durchzuführen. Der Einfluß von Kühlwassertemperatur, Restdentinstärke und Schleifzeit als variable Größen ist dabei von Bedeutung und muß berücksichtigt werden. Diese Bedingungen scheinen nur in einem in-vitro - Experiment verwirklicht werden zu können, das die Verhältnisse in vivo und ihre Umgebungsbedingungen ausreichend berücksichtigt. Dazu gehört die Verwendung frisch extrahierter menschlicher Zähne als Schleifobjekte, die Berücksichtigung der Wärmeableitung über das Parodont, eine Ausgangstemperatur in der Zahnpulpa von $37,0^{\circ}\text{C}$ und Arbeitsbedingungen bei einer simulierten Mundhöhlentemperatur von $34,0^{\circ}\text{C}$ (MAEDA et al. (42)). Die Wärmeableitung über das Blutgefäßsystem der Zahnpulpa gilt als hinreichend klein und darf deshalb vernachlässigt werden (14,67).

3. MATERIAL UND METHODE

3.1 Beschreibung der verwendeten Geräte

3.1.1 Die Antriebssysteme Turbine und Mikromotor

Die Schleifversuche dieser Arbeit erfolgten mit einer modernen Torque Turbine und einem Mikromotor mit Schnellauf-übersetzungswinkelstück. Wir verwendeten die KaVo Super-Torque LUX Turbine 630 B und den KaVo INTRA K-Mikromotor 186 B mit INTRAmatic LUX Schnellaufunterteil 24 L und INTRA LUX Kopf 2304 LD. Um einen besseren Einblick in ihre technischen Daten zu erhalten und Vergleiche mit anderen Antrieben zu ermöglichen, zeigen Abbildung 2 und 3 die Drehmoment- und Leistungskennlinien.



Abbildung 2: Drehmoment- und Leistungskennlinien,
KaVo Super-Torque Turbine 630 (Fa. KaVo)

Die gezeigte Kurve gilt für einen Antriebsluftdruck von 2,1 bar, der Luftverbrauch beträgt 34 - 37 NL/min. Das maximale Drehmoment von 0,13 Ncm wird bei kleinstmöglicher Drehzahl erreicht und nimmt mit steigender Drehzahl linear ab, bis es sich bei 320 000 U/min Null nähert.

Die größte Leistung von 10,4 Watt wird bei halber Turbinendrehzahl von 160 000 U/min erreicht. Zwischen 100 000 und 220 000 U/min beträgt die Leistung mehr als 9 Watt also ständig mindestens 90% ihres maximalen Wertes.

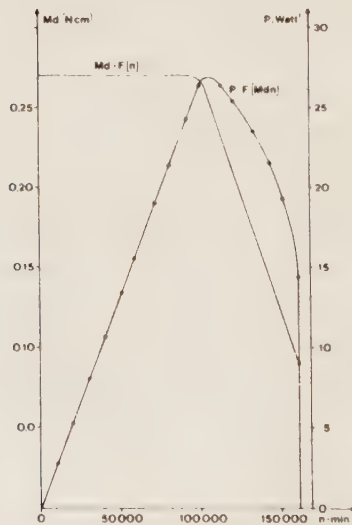


Abbildung 3: Drehmoment- und Leistungskennlinien,
INTRA K-Motors 186 B mit INTRA Übersetzungs-
winkelstück 24 B (Fa. KaVo)

Der Mikromotor als geregelter elektrischer Antrieb ist nicht von einem bestimmten Antriebsluftdruck abhängig. Lediglich für das KÜHLSpray ist eine Luftmenge von 30 NL/min erforderlich. Durch die eingebaute Steuerelektronik ist das Drehmoment (M_d) keine Funktion der Drehzahl. Ein maximaler Wert von 0,27 Ncm steht bis 100 000 U/min konstant zur Verfügung und sinkt erst bei höheren Drehzahlen bis auf 0,09 Ncm bei 160 000 U/min ab.

Die Leistung steigt mit zunehmender Umdrehungszahl linear bis 27 Watt solange das Drehmoment konstant ist. Darüber sinkt die Leistung entsprechend dem geringeren Drehmoment bis auf 9 Watt ab. Die maximale Leistung von 30 Watt kann nicht erbracht werden, da ein Teil durch Reibung in den Lagern verloren geht (LINGENHÖHLE (39)).

3.1.1.1 Die Drehzahl der rotierenden Instrumente

Die Drehzahl von Turbine und Schnellaufwinkelstück wurde mit einem elektronischen Drehzahlmeßgerät MOVIPORT D 711 der Firma IES (Industrie-Elektronik Stuttgart) gemessen, das mit einer Reflexionssonde ausgestattet ist. Eine dunkle Farbmarkierung auf einem glatten Schleifkörperrohling führt dabei zu Unterbrechungsimpulsen, die von einer Photozelle registriert werden. Die jeweilige Umdrehungszahl kann direkt auf einer analogen Anzeige mit verschiedenen Skalen für mehrere Meßbereiche abgelesen werden.

Bei der Turbine ließ sich auf diese Weise eine Leerlaufdrehzahl von 335 000 U/min ermitteln, die etwas über den Angaben des Herstellers von 320 000 U/min lag. Eine Messung während der Präparationsphase war nicht möglich, da sowohl die Diamantkörnung des Schleifkörpers als auch das Kühlwasserspray zu Lichtreflexionen führten, die das Meßergebnis verfälschten. Eine Orientierung für die entsprechenden

Belastungswerte konnte jedoch die Arbeit von MARTIN (45) geben, der für die KaVo Super Torque Turbine 630 bei gleicher Vorschubkraft die Drehzahl während des Schleifens an Dentinkörpern bestimmte. Dazu wurde der Gehäusedeckel der Turbine abmontiert und eine Farbmarkierung am rotierenden Kugellagerinnenring angebracht. Ein derartiger Versuchsaufbau war in dem geschlossenen Plexiglasgehäuse nicht möglich. MARTIN ermittelte Werte von 220 000 - 260 000 U/min. Die Leistungskennlinie der Turbine (Abb. 2) zeigt, daß dabei eine Leistung von 6,3 - 9 Watt erbracht wird, also 61 - 87 % der vollen Turbinenleistung zur Verfügung stehen.

Für den KaVo INTRA K-Mikromotor 186 B werden von der Herstellerfirma maximal 40 000 Umdrehungen/min angegeben, die in Verbindung mit dem INTRAmatic LUX Schnellaufwinkelsstück 24 L bei einer Übersetzung von 1 : 4 Drehzahlen bis 160 000 U/min ermöglichen. Bei der Überprüfung der Drehzahl mit dem MOVIPORT Meßgerät ergaben sich Werte von 160 000 - 165 000 U/min. Die Leerlaufdrehzahlen lassen sich beim Mikromotor auch auf die Arbeitsphasen übertragen, da der Antrieb elektronisch geregelt ist, und die Drehzahl unabhängig von der Belastung gesteuert wird. Abbildung 3 zeigt, daß bei der gemessenen Drehzahl eine Leistung von 9 - 15 Watt zur Verfügung steht. Das sind 35 - 55 % der größtmöglichen Leistung des Mikromotors.

3.1.1.2 Die Vorschubkraft beim Schleifprozess

Der Vorschubkraft ist beim Schleifprozess eine große Bedeutung beizumessen, da mit steigenden Vorschubkräften auch die produzierte Reibungswärme zunimmt. Dies gilt vor allem für Antriebe, bei denen nur ein geringes Drehmoment zur Verfügung steht, das heißt, der Schleifkörper nur eine sehr geringe kinetische Energie besitzt. Bei luftgelagerten Turbinen wird daher eine Vorschubkraft von 0,5 N als optimal angesehen (1). Bei intermittierender Arbeitsweise sind auch Werte von 0,7 - 0,9 N noch zu tolerieren (63), die zu einer Steigerung der Schleifleistung führen. Mit der Einführung durchzugsstarker Kugellagerturbinen ist auch bei der Turbine die Möglichkeit des Kontaktschleifens gegeben. Sie läßt Vorschubkräfte von 1,0 N und darüber zu (60).

Beim Mikromotor steht über den elektrisch geregelten Antrieb ein höheres Drehmoment zur Verfügung, das die Anwendung eines größeren Anpreßdruckes bei der Zahnpräparation erlaubt, ohne den Schleifkörper zum Stillstand zu bringen. Als Ergebnis bisheriger Temperaturmessungen werden optimale Vorschubkräfte von 1,5 - 2,5 N angegeben (1,10,45,50).

Als Resultat bisheriger Untersuchungen erschien eine Vorschubkraft von 1,0 N bei der Turbinenpräparation und 2,0 N bei Anwendung des Mikromotors optimal zu sein. Unter Ausnutzung der hohen Schleifleistung moderner Geräte war damit die Möglichkeit des Kontaktschleifens gegeben. Gleichzeitig wurde mit Vermeidung höherer Vorschubkräfte ein schonendes Präparationsverfahren gewählt, das eine möglichst geringe thermische Belastung für den Zahn berücksichtigen sollte.

3.1.1.3 Das Spraysystem

Die ungenügende Kühlwirkung des Einstrahlkühlsystems ist hinlänglich bekannt, weshalb es nur noch bei Mikroantriebsköpfen für problematische Arbeitsgebiete Verwendung findet. Die Turbine und der Kopf des Schnellaufwinkelstückes waren daher bei unseren Temperaturmessungen mit einem Dreistrahl-Kühlsystem ausgestattet und wiesen prinzipiell die gleichen Konstruktionsmerkmale auf (LINGENHÖHLE (39)). Die Kühlluft wird im Antriebskopf in einen inneren, das Kühlwasser in einen äußeren Ringkanal geleitet. Die Mischung beider Medien zum Kühleispray erfolgt druckunabhängig an den drei Austrittsdüsen. KLAIBER et al. (29) haben die Überlegenheit dieses Spraysystems nachgewiesen und gezeigt, daß es von der Position des Antriebs zum Zahn und somit von der Anordnung der Spraystrahlen zum Werkstück unabhängig ist.

3.1.1.4 Sprayluft, Kühlwassermenge und Kühlwassertemperatur

Die Bedeutung der Luftmenge erschien im Vergleich zur Wassermenge beim druckunabhängigen Spraysystem relativ gering. Sprayluftmengen von 1 l/min sollten allerdings nicht unterschritten werden, um die Effizienz der Spraykühlung nicht einzuschränken. Die Empfehlung des Herstellers liegt nach Untersuchungen KLAIBERS et al. (29) bei 3 l/min. Dieser Wert wurde bei unseren Schleifversuchen zur Optimierung des Kühleffekts berücksichtigt.

Die Spraywassermenge kann bei den meisten Antriebssystemen am Instrumentenschaft reguliert werden. Dabei werden häufig zu geringe Wassermengen von 10 - 30 ml/min eingestellt, obwohl konstruktionsbedingt wesentlich höhere Werte zu erreichen wären (24). Viele Untersuchungen haben zu der einheitlichen Beobachtung geführt, daß Spraywassermengen von 40 - 50 ml/min erforderlich sind, um dem Temperaturproblem bei der Zahnpräparation mit einem effektiven Kühlwasserspray ausreichend zu begegnen. 30 ml/min sollten dabei auf keinen Fall unterschritten werden (24,29,40,45). Unter Berücksichtigung dieser Ergebnisse wurde die Kühlwassermenge bei beiden Antriebssystemen auf 50 ml/min eingestellt.

Die Kühlwassertemperatur findet oft sehr wenig Beachtung, und nur einzelne Autoren nehmen Stellung dazu. EICHNER (9) bemerkt, daß sie zwischen 27,0 und 45,0° C liegen sollte, um nicht zu Schmerzempfindungen zu führen. Werte von 37,0° C empfindet er keinesfalls als zu hoch. Temperaturmessungen mit verschiedenen Turbinensystemen führten KLOS und ROTTKE (32) durch. Sie bestimmten die Kühlwassertemperatur am Geräteeingang und im Spraynebel in Abhängigkeit von der Aufheizung des Kühlwasserbehälters und der geringeren Wärmeabgabe an das Durchlaufsystem nach längeren Arbeitszeiten. Bei der KaVo Turbine konnten sie eine Steigerung von Zimmertemperatur bis maximal 32,0° C registrieren bei einer Temperatur des Vorwärmbehälters von 70,0° C. Das Siemenssystem war auf weitaus höhere Werte abgestimmt und konnte nach einer Betriebsdauer von 1 h Temperaturen bis zu 40,0° C erreichen. Es ist dabei zu beachten, daß bei diesen Messungen die Temperaturen im Spraynebel um 2,0° C unter den Werten am Geräteeingang liegen.

Um eine Orientierung für die Einstellung der Kühlwassertemperaturen zu erhalten, mußten eigene Temperaturmessungen an verschiedenen Dentaleinheiten erfolgen. Dazu verwendeten wir Lichtleiterinstrumente, die in Dauerbetrieb eine größere Wärmeexposition auf die Kühlwasserzuleitung ausüben als

andere Antriebseinheiten. Die Turbine und das Winkelstück waren mit einer kleinen Bohrung in den Kühlwasserkanal versehen, die zur Aufnahme eines Ni-Cr-Ni Thermoelementes diente, um die Kühlwassertemperatur am Eingang des Instrumentenschafes zu messen. Die jeweilige Temperatur wurde von einem angeschlossenen Digitalmeßgerät angezeigt. Ausgehend von Zimmertemperaturen konnten mit der Turbine im Dauerbetrieb Temperaturmaxima von $35,0^{\circ}\text{C}$ bis etwas über $40,0^{\circ}\text{C}$ erreicht werden. Noch höhere Resultate brachten Messungen mit dem Schnellaufwinkelstück durch die Entstehung großer Reibungswärme in den Übersetzungslagern bei hohen Drehzahlen. Das Schnellaufwinkelstück erwärmte sich dabei spürbar. Es ergaben sich Temperaturen deutlich über $40,0^{\circ}\text{C}$, bei intermittierenden Arbeitsphasen sogar ein Spitzenwert von $45,1^{\circ}\text{C}$, der mit dem Lichtleiterschnellaufwinkelstück an einer Siemens M 1 Einheit erreicht wurde. Bei 30 sec Laufphase unterbrochen von jeweils 30 sec Pause wurde das Temperaturmaximum dabei schon nach 8 - 10 Arbeitsintervallen erreicht.

Angesichts dieser Resultate wurden zwei verschiedene Versuchsreihen durchgeführt, um einen Einfluß der Kühlwassertemperatur bei der Zahnpräparation darstellen zu können. Die eine Hälfte der Messungen untersuchte die thermischen Auswirkungen in der Zahnpulpa beim Schleifen mit Kühlwassertemperaturen von etwa $32,0^{\circ}\text{C}$, die den Empfehlungen des Herstellers entsprechen. Die anderen Versuche fanden mit $10,0^{\circ}\text{C}$ höheren Kühlwassertemperaturen von etwa $42,0^{\circ}\text{C}$ statt, die nach längeren Betriebszeiten durchaus zu erreichen sind. Eine Einstellung der Kühlwassertemperaturen war über eine stufenlose Regelung der Heizung des Kühlwasserbehälters nur in der Größenordnung einzelner Grade möglich, da die registrierten Werte von der Vorwärmzeit der Versorgungseinheit und der Schleifzeit des einzelnen Versuches abhängig waren.

3.1.1.4 Verwendete Schleifkörper

Bei der Kronenpräparation werden heute nahezu ausschließlich diamantierte Schleifkörper benutzt, da mit größeren Schnittgeschwindigkeiten als bei Hartmetallinstrumenten eine sehr große Schleifleistung erbracht werden kann. Je nach Korngröße werden dabei Rauhtiefen von 10 - 40 μm erreicht (55).

Bei Temperaturmessungen in der Zahnpulpa stellt sich für die Form eines geeigneten Schleifkörpers die Forderung nach einem zylindrischen oder nahezu zylindrischen Schleifkörperschaft, um möglichst konstante Schnittgeschwindigkeiten bei gleichbleibendem Schaftdurchmesser erzielen zu können. Eine besondere Problematik liegt nämlich in der Kühlung der Diamantspitze eines langen Instrumentes (45). Der Durchmesser des Schleifkörpers sollte nach Sicherheitsempfehlungen (DAHLIN (7)) einen Wert von 2,0 mm nicht überschreiten, wenn im höchsttourigen Bereich mit Drehzahlen über 300 000 U/min gearbeitet wird. Zusätzlich ergibt sich eine wirkungsvollere Kühlung schlanker Instrumente, da bei ihnen der Spraystrahl besser an die Schleiffläche gelangt (42,44). Die Länge von Schleifkörper und Schaft sollte zusammen in einem Bereich von 19 - 24 mm liegen, da der Kühlmittelstrahl etwa 7 mm unterhalb des Antriebskopfes die Instrumentenachse schneidet (47).

Aufgrund dieser Überlegungen verwendeten wir zylindrische Diamantschleifer Nr. 837 014 der Firma Komet. Die Diamantbeschichtung dieser Schleifkörper ist von mittlerer Korngröße. Die Länge unterhalb des Instrumentenschaftes beträgt 8,0 mm bei 1,4 mm Durchmesser des Schleifkopfes. Die Schleifkörper wurden nach jeweils drei Versuchen mit einer gesamten Schleifzeit von 2 - 3 min gegen ein neues Instrument ausgetauscht, da stumpfe und abgenutzte Schleifkörper die Reibungswärme beträchtlich erhöhen können (47).

3.2 Der Versuchsaufbau zur Simulation der in-vivo-Bedingungen

Einen Überblick über den Versuchsaufbau geben das Blockdiagramm in Abbildung 4 sowie die Abbildung 5.

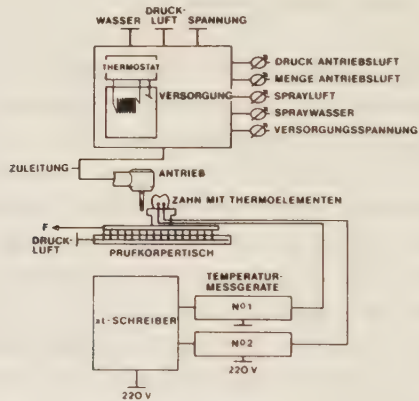


Abbildung 4: Blockdiagramm des Versuchsaufbaus

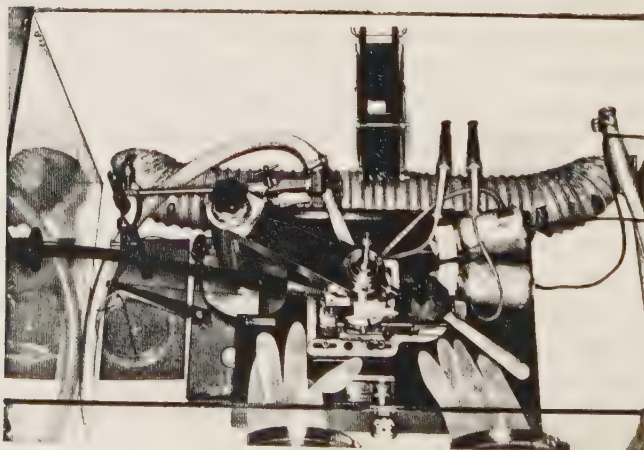


Abbildung 5: Der Versuchsaufbau

3.2.1 Die Schnellspannvorrichtung nach LAUER (35)

Das Kernstück des Versuchsaufbaus bildete eine Haltevorrichtung (35), die für die extraorale Präparation zu replantierender und transplantierender Zähne verwendet wird. Sie schafft aber auch bei experimentellen Untersuchungen zur Wärmeentwicklung im Pulpakavum optimale Versuchsbedingungen. Die Vorrichtung gliedert sich in drei Teile, die die Forderungen nach bestmöglicher extraoraler Konservierung eines frisch extrahierten menschlichen Zahnes berücksichtigt (Abb.6):

- 1.Die mechanische Haltevorrichtung.
- 2.Der Behälter zur Aufnahme des Zwischenmediums.
- 3.Die KuhlSchlange zur Temperierung des Zwischenmediums.

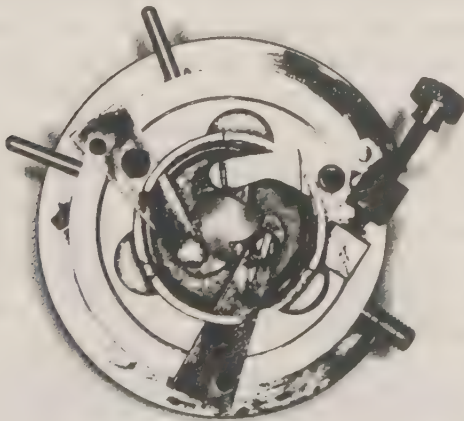


Abbildung 6: Die Schnellspannvorrichtung mit napfförmigen Behälter zur Temperierung des Zwischenmediums

Die mechanische Haltevorrichtung ist als Schnellspannvorrichtung konstruiert. Sie besteht aus einem durch Feststellschrauben fixiertem Aussenring, in dem ein zweiter, sogenannter Innenring, drehbar gelagert ist. Über zwei Greifstifte können die Ringe gegen die Kraft einer Zugfeder gegeneinander bewegt werden. Auf diese Weise öffnen sich drei Schwenkhebel, die auf der Oberseite mit beiden Ringen beweglich verschraubt sind und in den Innenraum der beiden Ringe ragen. An den freien Enden der Schwenkhebel sind Klemmbacken aus Messing befestigt. Sie sind in ihrer Form der anatomischen Zahnkrone nachempfunden und sollen dem bearbeiteten Zahn möglichst große Retention gewähren. Entgegen der Verwendung der Haltevorrichtung bei Replantation und Transplantation konnte bei unseren thermischen Schleifversuchen der Zahn nicht an der größten Zirkumferenz der Krone, die einen optimalen Halt gewährt, eingespannt werden. Um die Zahnkrone den Schleifversuchen zugänglich zu machen, mußte sie aus der Schnellspannvorrichtung herausragen, so daß zur Fixierung des Zahnes das obere Wurzeldrittel diente.

Den zweiten Baustein der Haltevorrichtung bildet ein napfförmiger Aluminiumbehälter, der von unten in die Öffnung des Innenringes eingesetzt werden kann und mittels eines Bajonettverschlußes an den Schwenkhebeln fixiert wird. Er dient zur Aufnahme des Zwischenmediums, in dem der Zahn während der Versuchsphase lagern soll. Durch eine zentrale Öffnung im Boden des Napfes konnten bei unseren Versuchen die beiden Thermoelemente das apikale Ende des Zahnes erreichen. Zum Einfüllen des semisoliden Zwischenmediums wurde diese zentrale Öffnung mit einem Parafilm[®] abgedichtet, bis das Medium aufgrund der Abkühlung durch die Kühlschlange erstarrt war.

Zur Erhaltung einer definierten Temperatur während der gesamten Arbeitsphase am Schleifobjekt, dient eine Messingrohrwendel, die an der Innenwand des Napfes angebracht ist. Die Anschlüsse dieser Kühlschlange sind durch den Boden des Napfes geführt und können hier an einen Wasserkreislauf

angeschlossen werden, der mit einem Durchlaufthermostaten verbunden ist. Die Temperatur des Zwischenmediums wurde in unseren Versuchen auf $37,5^{\circ}\text{C}$ eingestellt, so daß an den Thermoelementen im Pulpakavum im unbelasteten Zustand eine physiologische Temperatur von $37,0 \pm 0,4^{\circ}\text{C}$ gemessen wurde, um die in - vivo - Bedingungen möglichst exakt zu simulieren.

3.2.2 Der Luftschlittentisch

Bei Arbeiten im Munde des Patienten werden Schnellaufwinkelstück und Turbine von der Hand des Zahnarztes geführt. Diese Arbeitsweise läßt keine genaue Bestimmung der Größe der Vorschubkraft, des Anstellwinkels vom Schleifkörper zum Schleifobjekt sowie von der abgetragenen Schichtdicke des Zahnes zu. Die angesprochenen Parameter sollten jedoch meßbar und jederzeit vorausbestimmbar sein, um die Versuche reproduzierbar zu gestalten. Dazu diente ein Luftschlittentisch (Fa. KaVo), der diese Bedingungen am besten erfüllte (Abb.7). Abbildung 8 zeigt eine Konstruktionsskizze.

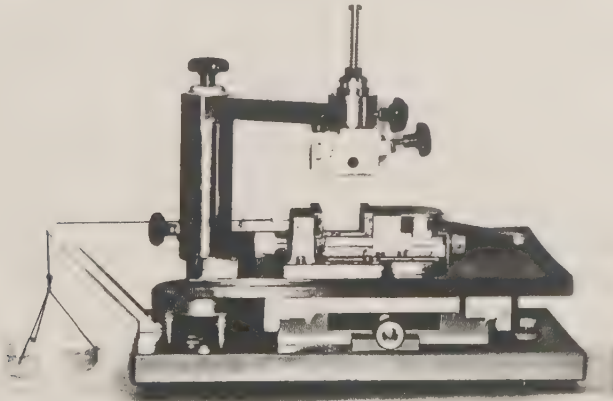


Abbildung 7: Der Luftschlittentisch mit Seilzug und Gewichtsschale

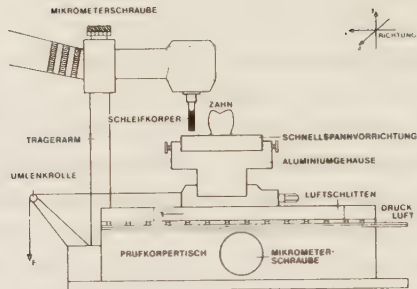


Abbildung 8: Konstruktionsskizze des Luftschlittentisches

In einer Grundplatte befindet sich eine rechteckige Aussparung von 210 mm Länge, 110 mm Breite und 8 mm Tiefe. Durch viele kleine Bohrungen am Boden dieser Aussparung strömt eine zugeführte Druckluft von 2 bar und baut ein Luftpolster auf. Darauf gleitet praktisch reibungslos ein Schlitten von 160 mm Länge in x-Richtung (Abb.10). Auf dem Schlitten läßt sich in einer speziellen Halterung ein Aluminiumgehäuse arretieren, in dem über vier Feststellschrauben die Schnellspannvorrichtung nach LAUER(35) fixiert werden kann. Eine große Wanne dient als Auffangbecken für das Spraywasser. Zur Steuerung der Vorschubkraft ist am Schlitten eine Schnur angebracht, die über eine Umlenkrolle mit einer Schale zur Aufnahme verschiedener Gewichtsstücke verbunden ist. Die Gewichtskraft bestimmt dabei die Vorschubkraft, die senkrecht am Prüfkörper in x-Richtung wirkt.

Zur Seite hin, in z-Richtung, wird die Bewegung des Luftschlittens durch die Aussparung der Grundplatte begrenzt. Ein maximaler Luftspalt von 0,005 mm beidseits ermöglicht ein Spiel des Schlittens von 0,1 mm in dieser Richtung. Die Steuerung der Bewegung in z-Richtung erfolgt über eine Mikrometerschraube, die die gesamte Grundplatte mit dem Luftschlitten in diese Richtung bewegt. Eine Skaleneinheit der Mikrometerschraube entspricht dabei einer Auslenkung von 0,05 mm. Da die Turbine oder der Mikromotor mit aufgesetztem Schnellaufwinkelstück an einem schwenkbaren Trägerarm durch eine Spannvorrichtung fixiert sind, kann über die Bewegung in z-Richtung die Stärke der pro Arbeitsgang abzutragenden Zahnhartsubstanz bestimmt werden.

Mittels einer zweiten Mikrometerschraube (Skaleneinheit 0,05 mm) kann der Trägerarm in der Höhe und somit in y-Richtung verstellt werden. Damit ist eine optimale Anpassung des Schleifkörpers an den jeweils zu bearbeitenden Zahn in der Schnellspannvorrichtung möglich.

Zur exakten Ausrichtung des Luftschlittentisches in der Horizontalen befindet sich in der Grundplatte eine Wasserwaage. Gemäß ihrer Anzeige kann die Lage der Grundplatte über vier regulierbare Standbeine verändert werden, um den Störeffekt eigener Gewichtskräfte des Luftschlittens bei nicht waagrechter Stellung auszuschließen.

3.2.3 Das geschlossene Plexiglasgehäuse zur Simulation der Mundhöhlentemperatur (36)

Die Umgebungsbedingungen unter denen die Schleifversuche durchgeführt wurden, sollten der Situation in vivo möglichst gerecht werden. Daher durfte auch die Mundhöhlentemperatur des Patienten nicht unberücksichtigt bleiben, da sich mit ihm für den Zahnarzt in der Praxis obligatorische Arbeitsbedingungen stellen. Diesen äußeren Bedingungen wurde Rechnung getragen, indem ein Plexiglasgehäuse zur Aufnahme des gesamten Versuchsaufbaus konstruiert wurde (Abb.9). Damit konnte eine Mundhöhlentemperatur von $34,0 \pm 0,5^{\circ} \text{C}$ (MAEDA et al. (42)) nachempfunden werden, die während Temperaturmessungen bei Schleifversuchen von besonderer Bedeutung erschien (13,64). Auch weitere Parameter, die thermischen Einfluß erreichen können, wie zum Beispiel das Arbeiten mit einer Absauganlage während der Schleifversuche, konnten in diesem Arbeitsfeld der Situation in vivo sehr gut nachempfunden werden.

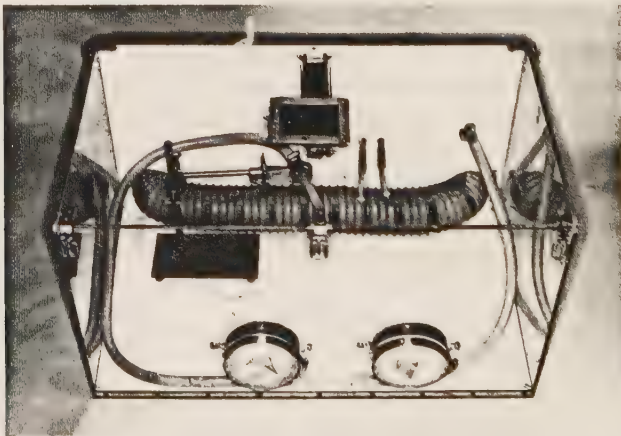


Abbildung 9: Das Plexiglasgehäuse mit Warmluftkreislauf, Ventilator, Absauganlage und Handschleusen

Der Boden und die Rückwand des Gehäuses waren als tragende Teile aus 20 mm starken Sperrholzplatten gefertigt. Stirn- und Seitenteile waren, ebenso wie der abnehmbare Deckel, zur besseren Einsicht auf den Versuchsaufbau aus 5 mm starkem Plexiglas gebaut. Die Temperatur wurde über einen Warmluftkreislauf geregelt, der von einem Heißluftfön mit einer Ausgangstemperatur von 50,0° C gespeist wurde. Die Regelung der Warmluftzufuhr erfolgte über einen Schaltthermostat mit einer Empfindlichkeit von $\pm 0,5^\circ \text{C}$. Verzögerungen in diesem Regelkreis konnten minimiert werden, indem der Temperaturfühler des Schaltthermostaten von seiner thermisch schlecht leitenden Schutzkappe befreit wurde und in nächster Nähe des Luftschlittentisches mit dem Schleifobjekt, dem Zahn, platziert wurde. Neben dem Heißluftfön wurde vom Schaltthermostat gleichzeitig ein kleiner Ventilator im Versuchsgehäuse geregelt, der bei Betrieb des Heißluftföns für eine Umwälzung der Luft in dem geschlossenen Arbeitsfeld sorgte. Auf diese Weise konnte der Entstehung eines Temperaturgradienten im Plexiglasgehäuse entgegengewirkt werden. Um auch während der Schleifversuche die Umwelteinflüsse vom Arbeitsfeld fernzuhalten, befanden sich in der Plexiglasfront zwei Schleusen mit Gummihandschuhen. Sie ermöglichten die Bedienung des Luftschlittentisches und der Schnellspannvorrichtung während der Schleifphasen unter den gewählten Bedingungen. Der Aufbau und die Vorbereitung der einzelnen Versuche konnte bequem über den mit Zugschnallen fest verschließbaren Deckel des Versuchsgehäuses erfolgen.

3.3 Die Temperaturmessung und -aufzeichnung im Pulpakavum

3.3.1 Die Thermoelemente

Für die Messung im Pulpakavum bewährte sich ein Ni-Cr-Ni Mantelthermoelement der Firma Philips mit 0.25 mm Durchmesser (36,37). Trotz seines geringen Querschnittes ist es hinreichend stabil, um das Pulpagewebe durch einen Wurzelkanal bis unter das Pulpadach zu penetrieren. Die um den Faktor 10 höhere Wärmeleitfähigkeit des Drahtes, die zu unvermeidlichen Meßfehlern durch Wärmeableitung über den Metallmantel führt, kann wegen des geringen Durchmessers vernachlässigt werden. Die Wärmekapazität des Thermoelementes ist im Vergleich zum Zahn und zum umgebenden Parodontium wesentlich kleiner als 1 % (1:240 bis 1: 500) (19). Der störende Einfluß der erhöhten Leitfähigkeit in Längsrichtung der Drähte wurde zudem unterdrückt, indem versucht wurde, gemäß den Empfehlungen RICHTERS und STÜBENS (52) sowie HENNINGS und PRZETAKS (19), die Sonde in eine Fläche gleicher Temperatur (Isotherme) und somit senkrecht zum lokalen Temperaturgradienten zu legen.

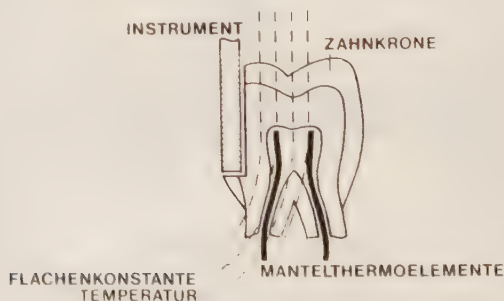


Abbildung 10: Optimale Lage der Thermosonde senkrecht zur Temperaturausbreitung

Überdies weist das Ni-Cr-Ni Element eine im Vergleich zu anderen Elementkombinationen relativ hohe Thermospannung von $40 - 42 \mu\text{V}/^\circ\text{C}$ auf (37). Im vorliegenden Meßbereich und im Rahmen der angestrebten Meßgenauigkeit von $1/10^\circ\text{C}$ ist dieser Spannungs-Temperatur-Gradient als konstant anzusehen. Durch Verwendung einer einfach abgeschirmten Doppellitze anstatt des zugehörigen Ni-Cr-Ni Meßkabels von Philips wurden die Referenzpunkte an die Steckkupplungen der Thermosonden "zurückverlegt", befanden sich also innerhalb des Plexiglasgehäuses. Die thermische Isolierung der Steckkupplungen als Referenzpunkte für die Temperaturmessung an der Sondenspitze war sehr problematisch. Bei einer verfügbaren Sondenlänge von 200 mm mußten die Steckkupplungen beweglich im Arbeitsbereich des Luftkissenschlittens untergebracht werden, um diesem bei den Schleifvorgängen folgen zu können. Die Unterbringung in einem getrennten, thermisch stabilisierten Kompartiment mußte also unter besonderen technischen Gesichtspunkten stehen. Die Steckkupplungen wurden daher in Plastikbehältern untergebracht, die, auf dem Schlittentisch befestigt, die Bewegungsfreiheit des Schleifobjektes bei den Versuchen nicht einengten. Zur thermischen Stabilisierung der Referenzpunkte diente der Wasserkreislauf zur Temperierung des Nährmediums im Behälter der Schnellspannvorrichtung. Er wurde dazu mit zwei Silikonschlauchspulen um die Steckkupplungen geführt. Für die Einhaltung einer konstanten Temperatur sorgte ein Durchlaufthermostat. Gegen Temperaturschwankungen durch den Warmluftkreislauf im Plexiglasgehäuse wurden die Referenzpunkte zusätzlich in den Plastikbehältern mit Montageschaum thermisch isoliert. Die dadurch erreichte konstante Temperierung der Steckkupplungen mit fließendem, $37,5^\circ\text{C}$ warmen Wasser war nicht nur aus praktischen Gründen von Vorteil, sondern auch im Interesse der Meßgenauigkeit, da diese durch Minimierung der Temperaturdifferenz zwischen Sondenmeß- und Sondenreferenzpunkt gesteigert werden kann. Ein Blockdiagramm der Temperaturmessung zeigt Abbildung 11.

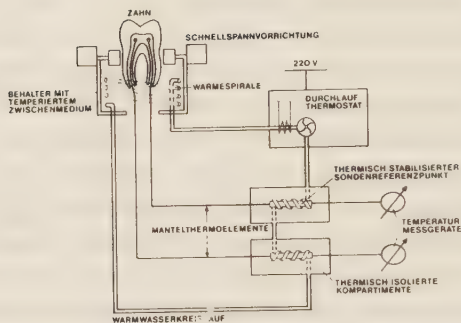


Abbildung 11: Blockdiagramm der Temperaturmessung

3.3.2 Die Temperaturmeßgeräte

Die frisch extrahierten Versuchszähne wurden in der Schnellspannvorrichtung in einem Zwischenmedium eingebettet und vorgewärmt. Es sollte möglichst exakt eine Temperatur von $37,0 \pm 0,4^\circ \text{C}$ im Pulpakavum erreicht werden, die über die Sondenspitzen der Mantelthermoelemente bestimmt werden konnte. Zu diesem Zweck wurden die Thermoelemente mit zwei Temperaturmeßgeräten THERM 2220-4 und THERM 2220-5 der Firma AMR (Ahlborn Meß- und Regeltechnik) verbunden, über deren Digitalanzeige eine ständige Kontrolle der Pulpatemperaturen möglich war. Abbildung 12 zeigt ein Meßgerät mit Thermoelement und isoliertem Referenzpunkt. Die Geräte sind für die Verwendung von Ni-Cr-Ni Thermoelementen ausgelegt. Die Nullpunktkorrektur erfolgt dabei automatisch und auch eine Vergleichskompensation befindet sich in diesen Geräten (45).

Ein weiteres Temperaturmeßgerät des Typs THERM 2210-7 diente dazu, die Kühlwassertemperatur am Eingang des Winkelstück-schaftes zu überprüfen und anzuzeigen. Die Messung erfolgte dabei über ein Ni-Cr-Ni Thermoelement (DIN 43 710; Fa. KaVo). Bei diesem Gerät wurde während der Schleifversuche eine Maximalwertspeicherung eingeschaltet, um die höchste Kühlwassertemperatur im Verlauf der einzelnen Versuche registrieren und später dokumentieren zu können.

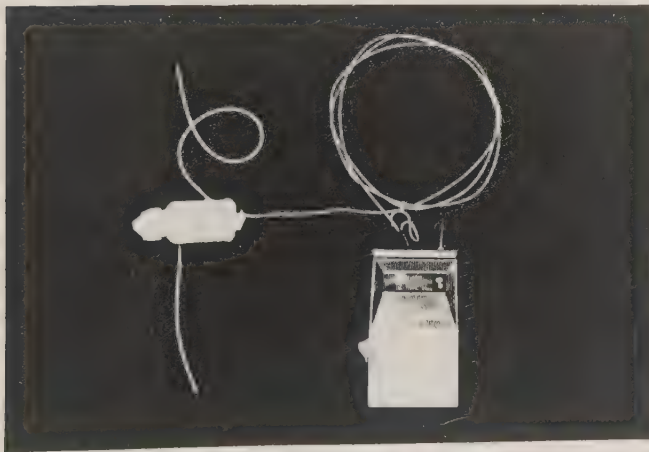


Abbildung 12: Thermoelement mit isoliertem Referenzpunkt und Temperaturmeßgerät

3.3.3 Der xt-Schreiber

Zur Aufzeichnung der Meßergebnisse stand ein 3-Kanal xt-Schreiber der Firma Riken Denshi zur Verfügung, dem zusätzlich ein integrierter Operationsverstärker vorgeschaltet wurde (Abb.13). Dieser Vorverstärker ermöglichte über ein Trimpmpotentiometer eine Nulllinienverschiebung weit über den Regelbereich des Schreibers hinaus. Dadurch konnten die durch Probeversuche eingegrenzten Meßbereiche zur Steigerung der Ablesegenauigkeit optimal auf das Format des Schreiberpapiers abgestimmt werden. Bei einer Papierbreite von 250 mm entsprach dabei $1,0^{\circ}\text{C}$ einer Distanz von 46 mm.

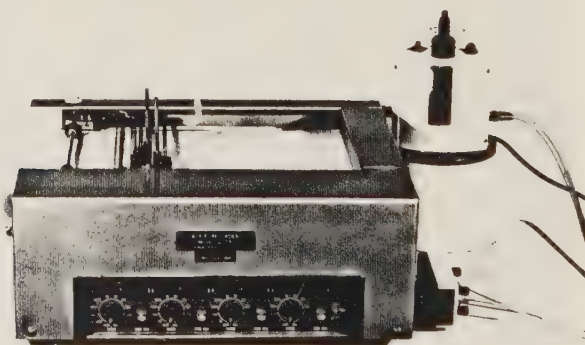


Abbildung 13: xt-Schreiber und Durchlaufthermostat

3.4 Die Versuchsdurchführung

3.4.1 Zahnauswahl, -konservierung und -vorbereitung

Im Interesse größtmöglicher Reproduzierbarkeit der Versuchsbedingungen wurden die Temperaturmessungen ausschließlich an frisch extrahierten, unversehrten Weisheitszähnen durchgeführt. Damit war die Unversehrtheit der die Kronenpulpa schützenden Dentin- und Schmelzstruktur gewährleistet. Dabei bestehen keine signifikanten Schwankungen individuell verschiedener Zähne bezüglich der Mineralisationsgüte (NENTWIG (48)). Die Zähne lagerten zwischen Extraktion und Versuchsbeginn in isotoner Kochsalzlösung, da nach KLÖTZER (30) die Wärmeentwicklung an trockenen, extrahierten Zähnen um 20 % höher als an feuchten Zähnen bewertet werden muß. Das Zeitintervall der Lagerung war auf maximal acht Stunden begrenzt.

Es erfolgte eine Vorauswahl der Weisheitszähne nach ihrer Extraktion, da zur Simulierung einer Kronenpräparation die gesamte Zahnkrone aus der Haltevorrichtung ragen mußte und somit die Klemmbacken nur auf Höhe des oberen Wurzeldrittels greifen konnten. Zu konische Wurzelformen boten vor allem bei Präparation mit dem Mikromotor und aufgesetztem Schnelllaufwinkelstück nicht genügend Retention, um der Vorschubkraft von 2,0 N standzuhalten und den Zahn ausreichend zu fixieren.

Daneben sollten die Versuchszähne auch in etwa gleiche Größe aufweisen, damit massenbedingte Unterschiede der Wärmespeicherung im Zahn und der Wärmeableitung über das Parodontium möglichst gering zu halten waren. Gemäß Untersuchungen STAMBAUGHS und WITTROCKS (62) über die Beziehung der Pulpa-kammer zur äußeren Oberfläche des Zahnes, war auf diese Weise zudem eine größere Übereinstimmung in der Wandstärke der Zahnhartsubstanzen und damit dem Abstand der Pulpa von der äußeren Oberfläche des Zahnes zu erreichen.

Weisheitszähne mit noch nicht abgeschlossenem Wurzelwachstum mußten wegen ihrer Disproportion von Krone zu Wurzel verworfen werden, da sowohl die Temperierung des Zahnes durch das Zwischenmedium als auch die simulierte Wärmeableitung bei Temperaturerhöhungen während des Schleifprozesses über zu kleine Zahnwurzeln nicht ausreichend erfolgen konnte. Auffällige Unterschiede in Wurzelgröße und -länge gingen von daher immer mit starken Verfälschungen der Meßergebnisse einher.

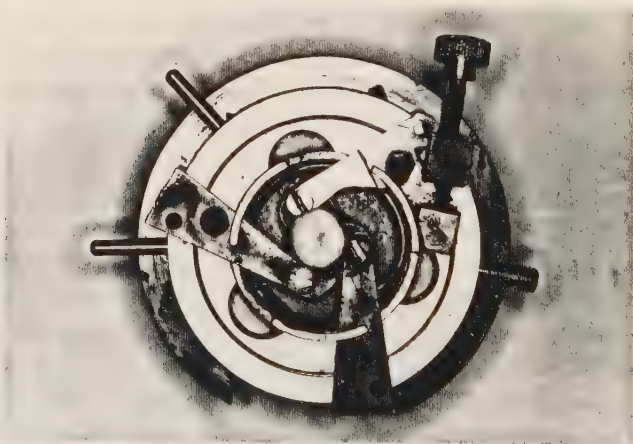


Abbildung 14: Frisch extrahierter Weisheitszahn in der Schnellspannvorrichtung

Die Vorbereitung der Zähne für die Versuche begann mit der Überprüfung ihrer guten Retention und einer einwandfreien Fixierung in der Schnellspannvorrichtung (Abb.14). Danach wurden die Wurzelspitzen abgetragen und die Wurzelkanäle mit Hilfe einer 10er Kerr Feile auf Gängigkeit überprüft. Waren drei oder mehr Wurzelkanäle vorhanden, wurden zwei, in mesio-distaler Richtung benachbarte und bezüglich Wurzelkrümmung

und Kanaldurchmesser günstige Wurzelkanäle für die Aufnahme der Thermoelemente bestimmt. Ein Röntgenbild überprüfte die Lage der Thermoelemente und der Sondenspitzen. Das Einbringen eines thermoleitenden Materials wie Plastemail oder Bariumsulfat war nicht erforderlich, da durch die sehr kurze und isotone Lagerung das Pulpagewebe gut konserviert werden konnte. Damit blieb auch die eigene Wärmeleitfähigkeit des Pulpagewebes möglichst gut erhalten und entsprach den Verhältnissen in vivo.

3.4.2 Exemplarische Beschreibung des Versuchsablaufes

Jeweils vor Versuchsbeginn wurden bei geschlossenem Plexiglasgehäuse die Wasserpumpe für ca. 2 Stunden und der temperaturgeregelte Föhn für ca. 1 Stunde eingeschaltet, um für die beiden Sondenreferenzpunkte thermisch stabile Verhältnisse zu schaffen. Daraufhin erfolgte eine Nachkontrolle der Eichung beider Meßkanäle. Zusätzlich wurden vor jedem Versuch die Höhe des Antriebsluftdrucks, sowie die Menge der zugeführten Antriebsluft, der Sprayluft und des Kühlwassers überprüft. Diese Größen konnten an einer Versorgungseinheit (Fa. KaVo) durch Regulierschrauben eingestellt werden. Die jeweiligen Werte wurden über geeichte Mengenmeßrohre (Fa. Krohe) abgelesen (Abb.15).

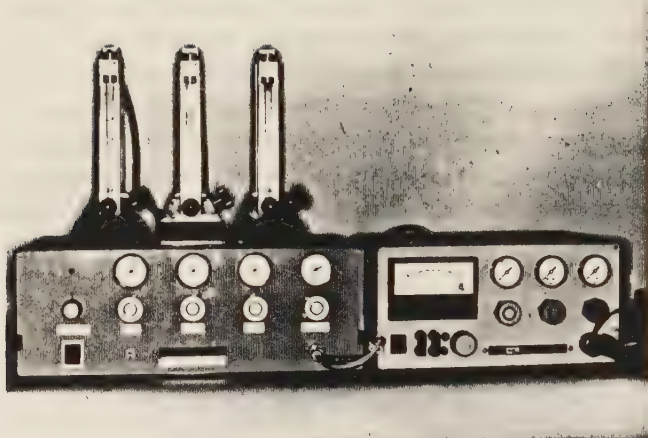


Abbildung 15: Die Versorgungseinheiten für Turbine und Mikromotor mit Mengenmeßrohren

Ein Zusatzgerät, das auch die Versorgungsspannung auf einem Gleichspannungsvoltmeter anzeigte, versorgte den Mikromotor. Über eine geeichte Skala konnte dabei die Drehzahl des Mikromotors kontrolliert werden. Statt der Antriebsluft bei Verwendung der Turbine wurde beim Mikromotor die Menge der zugeführten Kühlluft angezeigt, die eine Überhitzung des Gerätes vermeiden soll. Zusammenfassend wurden folgende Einstellungen gewählt:

- Antriebsluftmenge (Turbine) : 37 Nl/min
- Kühlluftmenge (Mikromotor) : 25 Nl/min

- Sprayluftmenge : 3 Nl/min

- Kühlwassermenge : 50 ml/min

- Druck der Antriebsluft : 2,1 bar

Zur geregelten Einstellung einer beliebigen Kühlwassertemperatur besaß die Versorgungseinheit ein thermostatgesteuertes Vorwarmbad. Die Anzeige und Kontrolle der Kühlwassertemperatur erfolgte nach entsprechender Vorlaufphase über das Thermoelement mit Meßgerät am Eingang des Instrumentenschaf-tes.

Die weitere Vorbereitung der einzelnen Schleifversuche erfolgte mit der Plazierung der Mantelthermoelemente. Dazu wurde der Zahn in die Haltevorrichtung eingespannt, und sein ausreichender Halt auch bei horizontalen Kräften überprüft. Nach dem Abkleben der zentralen Öffnung im Napf der Schnellspannvorrichtung mit Parafilm [®], wurden Sonde 1 und 2 zuerst durch diesen elastischen Schutzfilm gestoßen, von Hand in die apikal aufbereiteten Wurzelkanäle eingeführt und bis unter das Pulpadach vorgeschoben. Die Fixierung der Thermoelemente in dieser Position erfolgte mit einem Tropfen Klebewachs an den jeweiligen Wurzelspitzen. Anschließend wurde der Zahn bis unter die Zahnkrone mit 2% Agar in physiologischer Kochsalzlösung eingebettet, das durch Aufkochen in einem Wasserbad verflüssigt worden war. Nach Abkühlung und Verfestigung des Gels wurde ein vorbereiteter Kofferdamgummi auf Höhe der Schmelz-Zement-Grenze angelegt und an einem Halterahmen befestigt. Diese Maßnahme sorgte dafür, daß während der Schleifversuche kein Kühlwasser zwischen die temperierte Agar-Lösung und den Zahn eindringen konnte, um zu einer Irritation und Beeinflussung der Temperaturmessung im Pulpakavum zu führen.

Der schwenkbare Arm des Luftschlittentisches mit der eingespannten Antriebseinheit wurde in Höhe und Abstand (y- und z-Richtung) optimal in Relation zum Zahn gebracht und arretiert. Der Schleifkörper befand sich dabei knapp über der Schmelz-Zement-Grenze und lag tangential am größten Durchmesser der Zahnkrone an. Nun konnte der Deckel des Plexiglasgehäuses verschlossen werden. Bei einer Temperatur

des Zwischenmediums von $37,5^{\circ}\text{C}$ und einer Umgebungstemperatur im Plexiglasgehäuse von $34,0 \pm 0,5^{\circ}\text{C}$ war das angestrebte thermische Gleichgewicht von konstant $37,0 \pm 0,4^{\circ}\text{C}$ in der Kronenpulpa innerhalb einer Zeitspanne von 5 - 10 min erreicht. Der Heißluftfön wurde vor Beginn der Präparation abgeschaltet, da das thermische Gleichgewicht bei Schleifzeiten bis zu maximal 50 sec als konstant angesehen werden konnte. Gleichzeitig wurde die Schreiberaufzeichnung gestartet und die Absauganlage eingeschaltet, um auch deren thermischen Einfluß auf die Temperaturlaufzeichnung im Pulpakavum durch Konvektion zu simulieren. Die Antriebseinheit konnte über einen Fußschalter bedient werden. Es erfolgte ein kurzer Vorlauf von etwa 10 sec, um eine konstante Drehzahl und eine möglichst stabile Kühlwassertemperatur zu erreichen. Über die Mikrometerschraube, die die Position des Schleifobjektes in z-Richtung bestimmt, konnte genau die Stärke der jeweils abzutragenden Zahnhartsubstanzschicht eingestellt werden. Es erfolgten drei Schleifintervalle mit anfangs 0,8 mm und darauf zweimal 0,5 mm Schnitttiefe. Das erste Schleifintervall war um 0,3 mm größer, da eine entsprechend geringere Menge Zahnhartsubstanz an der äußeren Oberfläche der Zahnkrone zu sehr kurzen Schleifzeiten und damit sehr unterschiedlich langen Schleifintervallen geführt hätte. Anfang und Ende der einzelnen Schleifintervalle wurden auf dem Schreiberprotokoll markiert. Die Temperaturlaufzeichnung auf dem Schreiber endete ca. 30 sec nach Erreichen des Temperaturmaximums im Pulpakavum.

4. ERGEBNISSE

4.1 Darstellung des Temperaturverlaufes im Pulpakavum in Abhängigkeit verschiedener Präparationssysteme

Die Temperaturmessungen wurden unter vier verschiedenen Versuchsbedingungen durchgeführt. Der Temperaturverlauf bei Präparation mit der Turbine und dem Schnellaufwinkelstück wurde bei verschiedenen Kühlwassertemperaturen miteinander verglichen. Jede Gruppe umfaßte acht Versuche mit der Temperatureaufzeichnung von jeweils zwei Thermoelementen. Die Schreiberprotokolle stellen neben den beiden Einzelergebnissen auch die Relation zwischen mesialem und distalem Meßpunkt, sowie ihre zeitliche Abhängigkeit von den einzelnen Schleifintervallen dar. Für jede Versuchsreihe werden exemplarisch einige, charakteristische Schreiberprotokolle aufgezeigt.

4.1.1. Höchsttourige Präparation unter Verwendung der Turbine Kühlwassertemperatur: 29,8 - 31,8° C

Bei Kühlwassertemperaturen von 29,8 - 31,8° C können nach drei Schleifintervallen von insgesamt 26 - 42 sec keine relativen Temperaturerhöhungen im Pulpakavum festgestellt werden (Abb.16 und 17).

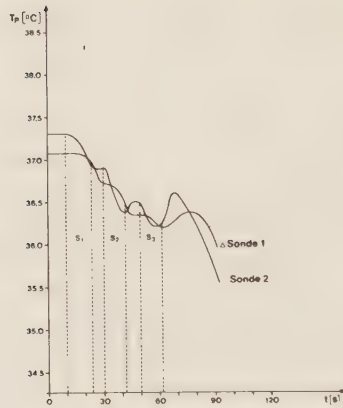


Abb.16a: Temperaturverlauf im Pulpakavum
bei Turbinenpräparation

Kühlwassertemperatur: 31,8° C

T : Temperatur im Pulpakavum in °C

t : Zeit in sec

S₁, S₂, S₃ : Schleifintervalle

Abb.16b: Zahn mit Thermoelementen;
Rö.- Zahnfilm



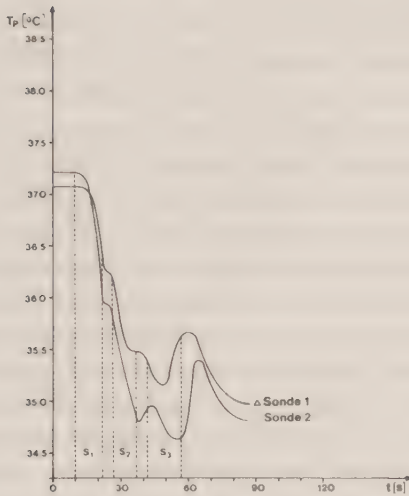


Abb.17a: Temperaturverlauf im Pulpakavum
bei Turbinenpräparation

Kühlwassertemperatur: $31,8^{\circ}\text{C}$

T : Temperatur im Pulpakavum in $^{\circ}\text{C}$

t : Zeit in sec

S_1, S_2, S_3 : Schleifintervalle

Abb.17b: Zahn mit Thermoelementen;
Rö.- Zahnfilm



Durch den Kühlwasserspray setzt mit Beginn der Zahnpräparation sofort ein kontinuierliches Absinken der Temperatur im Pulpakavum ein, das in seiner Größe und Stärke maßgeblich von der Kühlwassertemperatur mitbestimmt wird. Nach dem ersten Schleifintervall verläuft der Temperaturabfall langsamer oder kommt sogar kurzzeitig zum Stillstand. Nach dem zweiten Schleifintervall verstärkt sich dieser Effekt. Die Temperatur bleibt nahezu gleich oder steigt sogar leicht an. Gegen Ende der letzten Schleifphase wird erstmals ein sehr deutlicher Temperaturanstieg registriert. Er resultiert vor allem aus der geringeren Restdentinstärke durch den bisherigen Materialabtrag und ist in seiner Größe von der Entfernung des Schleifkörpers zur Sondenspitze des Thermoelementes abhängig. Davon lassen sich auch unterschiedliche Temperaturen bei den Meßwerten eines Zahnes ableiten. Sie beruhen auf der jeweiligen Position und Lage der Thermoelemente, die zum besseren Verständnis durch Röntgenaufnahmen der beschliffenen Zähne dargestellt ist. Der Temperaturabfall im Pulpakavum beträgt in Bezug auf den größten Meßwert nach dem letzten Schleifintervall $0,7 - 3,5^{\circ} \text{C}$. Der Zeitunterschied, mit dem die beiden Thermoelemente auf den thermischen Reiz durch den Materialabtrag reagieren, resultiert aus den fortlaufenden Präparationphasen, bei denen der Schleifkörper jeweils nacheinander auf die Sondenspitzen trifft.

4.1.2 Hochtpurige Präparation unter Verwendung des Mikromotors mit Schnellaufwinkelstück Kühlwassertemperaturen: 31,4 - 33,7° C

Bei der Praparation mit dem Schnellaufwinkelstück liegen bei niedrigen Kühlwassertemperaturen die Ausgangswerte in etwa 1,0 - 2,0° C höher (31,4 - 33,7° C) als bei den Schleifversuchen mit der Turbine. Diese Beobachtung läßt sich durch die zusätzliche Vorwärmung des Kühlwassers im Instrumentenschaft erklären, die aus der hohen Reibungswarme in den Übersetzungslagern des Schnellaufwinkelstückes resultiert. Entsprechend ist der initiale Temperaturabfall geringer als bei der Turbinenpräparation (Abb.19 und 20). Dies führt in der Regel zu deutlicheren Temperaturanstiegen nach dem letzten Schleifintervall, die den Ausgangswert von 37,0° C erreichen können. Abbildung 20 (Sonde 1) zeigt einen solchen Temperaturverlauf, bei dem das Pulpahorn nahezu eröffnet wurde. Die Restdentinstärke betrug hier 0,2 mm. Insgesamt ergeben sich für die relative Temperaturerniedrigung im Bezug auf das dritte Schleifintervall Werte von 0 - 2,7° C unter der jeweiligen Ausgangstemperatur (Abb.18, 19 und 20). Die Schleifzeiten sind durch die um 1,0 N größere Vorschubkraft bei dem besseren Durchzugvermögen des Mikromotors geringer und betragen 17 - 27 sec.

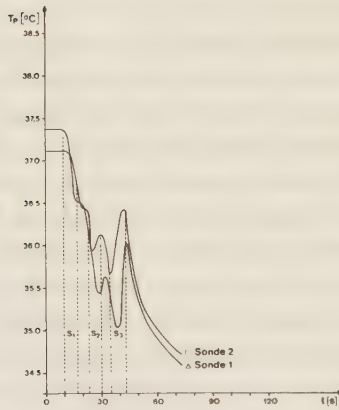


Abb.18a: Temperaturverlauf im Pulpakavum bei Präparation
mit dem Schnellaufwinkelstück

Kühlwassertemperatur: 31,4° C

T : Temperatur im Pulpakavum in °C

t : Zeit in sec

S₁, S₂, S₃ : Schleifintervalle

Abb.18b: Zahn mit Thermoelementen;

Rö.- Zahnfilm



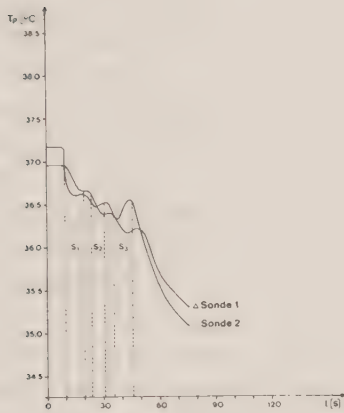


Abb.19a: Temperaturverlauf im Pulpakavum bei Präparation
mit dem Schnellaufwinkelstück

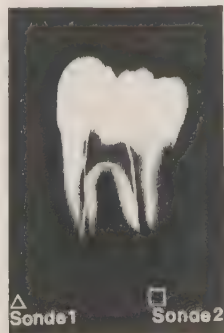
Kühlwassertemperatur: 31,5° C

T : Temperatur im Pulpakavum in °C

t : Zeit in sec

S₁, S₂, S₃ : Schleifintervalle

Abb.19b: Zahn mit Thermoelementen;
Rö.- Zahnfilm



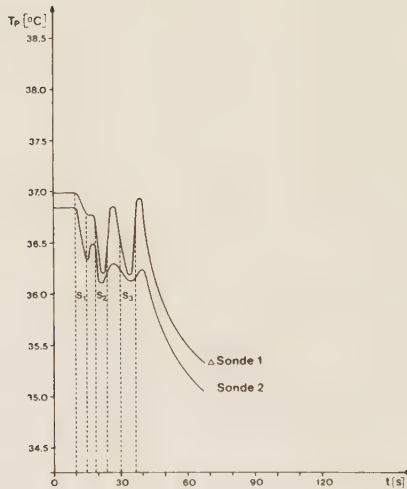


Abb.20a: Temperaturverlauf im Pulpakavum bei Präparation
mit dem Schnellaufwinkelstück

Kühlwassertemperatur: 31,6° C

T : Temperatur im Pulpakavum in °C

t : Zeit in sec

S_1, S_2, S_3 : Schleifintervalle

Abb.20b: Zahn mit Thermoelementen;
Rö.- Zahnfilm



4.1.3 Hochsttourige Präparation unter Verwendung der Turbine Kühlwassertemperatur: 42,2 - 44,4° C

Bei Kühlwassertemperaturen von 42,2 - 44,4° C erfolgt der initiale Temperaturabfall in der Pulpahöhle durch den Kühlwasserspray der Turbine nur noch andeutungsweise. Es ergeben sich mit jedem Schleifintervall Temperaturerhöhungen, deren Spitzen jeweils in den Pausen registriert werden. Die Temperaturspitzen sind wesentlich ausgeprägter als bei den niedrigen Kühlwassertemperaturen und erscheinen daher schon nach den beiden ersten Schleifintervallen sehr deutlich (Abb.21, 22 und 23). Der höchste Wert wird nach der letzten Schleifphase erreicht und ist von der Kühlwassertemperatur (vgl. Abb.31), der Restdentinstärke (vgl. Abb.32) und der Größe des beschliffenen Zahnes abhängig. Mit einer relativen Temperaturerhöhung in der Zahnpulpa von 0,4 - 3,0° C über den Ausgangswert kann insgesamt eine Temperatur von 40,0° C erreicht werden (Abb.23). Die Schleifzeiten betragen 24 - 36 sec.

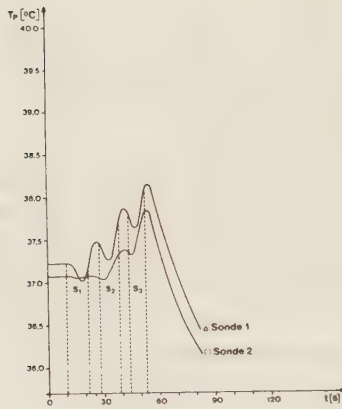


Abb.21a: Temperaturverlauf im Pulpakavum
bei Turbinenpräparation

Kühlwassertemperatur: 43,2° C

T : Temperatur im Pulpakavum in °C

t : Zeit in sec

S_1, S_2, S_3 : Schleifintervalle

Abb.21b: Zahn mit Thermoelementen;
Rö.- Zahnfilm



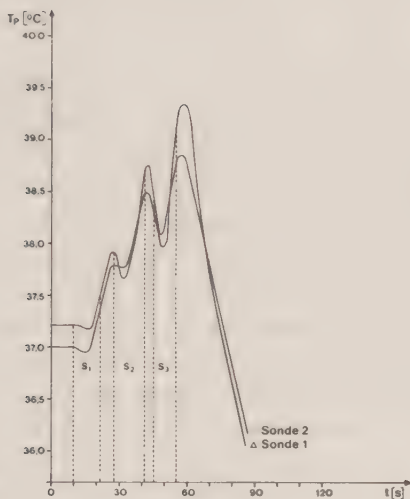


Abb.22a: Temperaturverlauf im Pulpakavum
bei Turbinenpräparation

Kühlwassertemperatur: 43,2° C

T : Temperatur im Pulpakavum in °C

t : Zeit in sec

S₁, S₂, S₃ : Schleifintervalle

Abb.22b: Zahn mit Thermoelementen;
Rö.- Zahnfilm



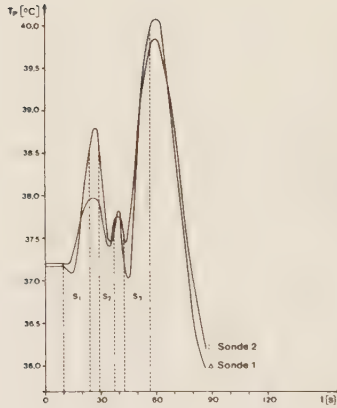


Abb.23a: Temperaturverlauf im Pulpakavum
bei Turbinenpräparation

Kühlwassertemperatur: 44,4 $^{\circ}\text{C}$

T : Temperatur im Pulpakavum in $^{\circ}\text{C}$

t : Zeit in sec

S_1, S_2, S_3 : Schleifintervalle

Abb.23b: Zahn mit Thermoelementen;
Rö.- Zahnfilm



4.1.4 Hochtourige Präparation unter Verwendung des Mikromotors mit Schnellaufwinkelstück Kühlwassertemperaturen: 42,1 - 43,6° C

Die Verwendung des Schnellaufwinkelstückes führt bei Kühlwassertemperaturen von 42,1 - 43,6° C ebenso wie bei der Turbinenpräparation zu einem Temperaturverlauf mit ausgeprägten Temperaturspitzen nach allen drei Schleifintervallen. Die relative Temperaturerhöhung im Pulpakavum nach der dritten Schleifphase beträgt dabei 0,1 - 2,8° C über dem Ausgangswert (Abb.24, 25 und 26). Sie ist aber im Gegensatz zu den Temperaturmessungen bei der Turbine nicht von der Restdentinstärke (vgl. Abb.35), sondern nur von der jeweiligen Kühlwassertemperatur (vgl. Abb.34) und der individuellen Größe der beschliffenen Zähne abhängig. Die Schleifzeiten sind mit 21 - 27 sec bei Anwendung einer Vorschubkraft von 2,0 N wiederum deutlich geringer als bei Verwendung der Turbine. Die schnellere Folge der Schleifintervalle führt dabei zu einem weniger ausgeprägten Absinken der Temperatur zwischen den Temperaturspitzen, das auch völlig ausbleiben kann (Abb.25 und 26).

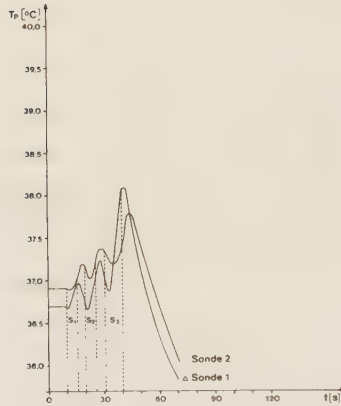


Abb.24a: Temperaturverlauf im Pulpakavum bei Präparation mit dem Schnellaufwinkelstück

Kühlwassertemperatur: 41,8° C

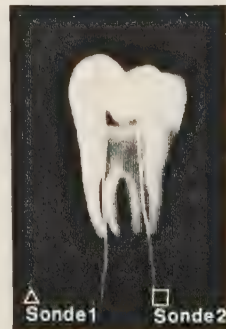
T : Temperatur im Pulpakavum in °C

t : Zeit in sec

S₁, S₂, S₃ : Schleifintervalle

Abb.24b: Zahn mit Thermoelementen:

Rö.- Zahnfilm



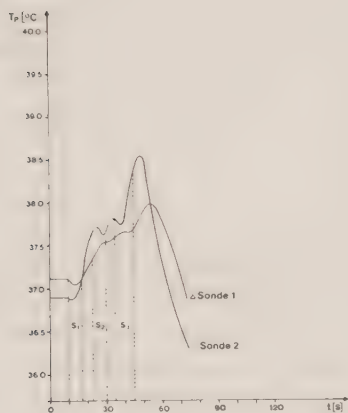


Abb.25a: Temperaturverlauf im Pulpakavum bei Präparation
mit dem Schnellaufwinkelstück

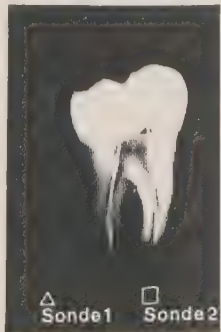
Kühlwassertemperatur: 42,8° C

T : Temperatur im Pulpakavum in °C

t : Zeit in sec

S₁, S₂, S₃ : Schleifintervalle

Abb.25b: Zahn mit Thermoelementen;
Rö.- Zahnfilm



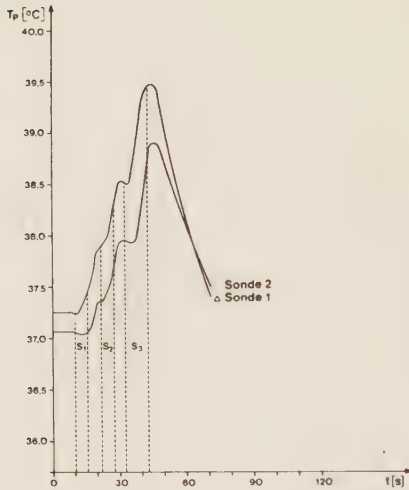


Abb.26a: Temperaturverlauf im Pulpakavum bei Präparation
mit dem Schnellaufwinkelstück

Kühlwassertemperatur: 43,6° C

T : Temperatur im Pulpakavum in °C

t : Zeit in sec

S₁, S₂, S₃ : Schleifintervalle

Abb.26b: Zahn mit Thermoelementen;
Rö.- Zahnfilm



4.2 Vergleich der relativen Temperaturänderung im Pulpakavum bei Präparation mit der Turbine und dem Schnellaufwinkelstück

Die Ermittlung der relativen Temperaturänderung aus den Schreiberprotokollen erfolgte bei Turbinenpräparation und Präparation mit dem Schnellaufwinkelstück in gleicher Weise. Dabei wurde die Differenz der höchsten Pulpatemperatur nach Beendigung des letzten Schleifintervalls zur Ausgangstemperatur gebildet. Bei niederen Kuhlwassertemperaturen ergab sich eine Temperaturerniedrigung, da die Pulpatemperaturen den Ausgangswert nicht erreichen konnten (Abb. 27). Bei hohen Kuhlwassertemperaturen wurde eine Temperaturerhöhung registriert (Abb. 28).

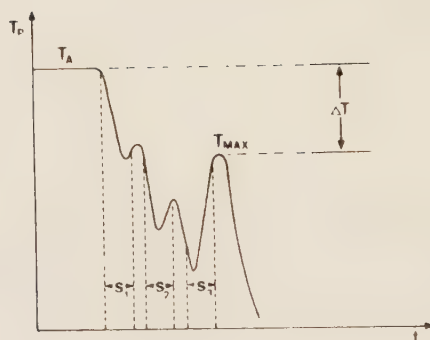


Abb.27: Schematische Darstellung der relativen Temperaturänderung im Pulpakavum bei Präparation mit Turbine und Mikromotor

Kühlwasser-

temperatur : 29,8 - 33,7° C

ΔT : relative Temperaturänderung im Pulpakavum

T_A : Ausgangstemperatur

T_{max} : maximale Temperaturerhöhung nach Beendigung der Schleifintervalle

S_1, S_2, S_3 : Schleifintervalle

T_p : Temperatur im Pulpakavum

t : Zeit

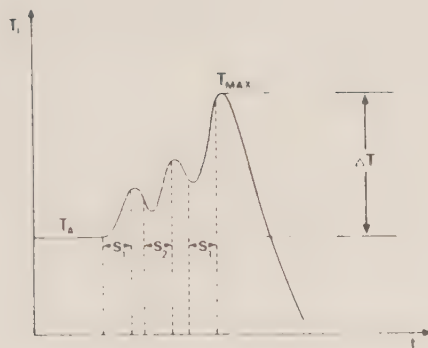


Abb.28: Schematische Darstellung der relativen Temperaturänderung im Pulpakavum bei Präparation mit Turbine und Mikromotor

Kühlwasser-

temperatur : 42,1 - 44,4° C

ΔT : relative Temperaturänderung im Pulpakavum

T_A : Ausgangstemperatur

T_{Max} : maximale Temperaturerhöhung nach Beendigung der Schleifintervalle

S_1, S_2, S_3 : Schleifintervalle

T_P : Temperatur im Pulpakavum

t : Zeit

Aus den Schreiberprotokollen wurden für Turbine und Mikromotor pro Versuchsreihe 16 Temperaturmessungen ausgewertet. Die Meßwerte sind in Abbildung 29 und 30 für Turbine und Mikromotor getrennt, im Vergleich zu ihrem jeweiligen arithmetischen Mittel dargestellt. Die Versuchsbedingungen bei niedrigen und hohen Kühlwassertemperaturen sind durch Eintragung der Temperaturen mit unterschiedlichen Symbolen (o und ●) gekennzeichnet.

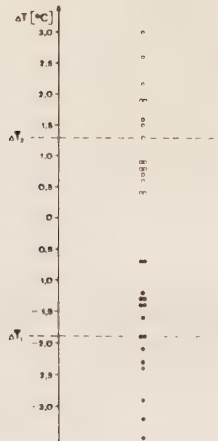


Abb.29:Relative Temperaturänderung im Pulpakavum
bei Präparation mit der Turbine

o : Meßwerte 01 - 16

Kühlwassertemperatur 29,8 - 31,8° C

● : Meßwerte 17 - 32

Kühlwassertemperatur 42,2 - 44,4° C

ΔT : relative Temperaturänderung im Pulpakavum in °C

$\Delta \bar{T}_1$: arithmetisches Mittel von ΔT der Meßwerte 01-16

$\Delta \bar{T}_2$: arithmetisches Mittel von ΔT der Meßwerte 17-32

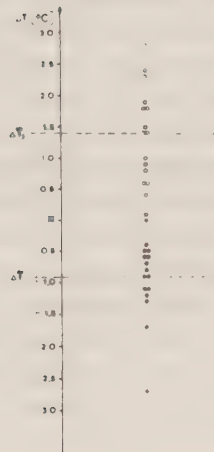


Abb.30: Relative Temperaturänderung im Pulpakavum
bei Präparation mit dem Mikromotor

o : Meßwerte 01 - 16

Kühlwassertemperatur 31,4 - 33,7° C

● : Meßwerte 17 - 32

Kühlwassertemperatur 42,1 - 43,6° C

ΔT : relative Temperaturänderung im Pulpakavum in °C

$\overline{\Delta T}_1$: arithmetisches Mittel von ΔT der Meßwerte 01-16

$\overline{\Delta T}_2$: arithmetisches Mittel von ΔT der Meßwerte 17-32

Im Vergleich der beiden Antriebssysteme fallen vor allem bei niederen Kühlwassertemperaturen die deutlich geringeren Temperaturwerte bei der Turbinenpräparation auf. Sie liegen mit einer relativen Temperaturerniedrigung von $0,7 - 3,5^{\circ}\text{C}$ deutlich unter den Ergebnissen des Schnellaufwinkelstückes ($0 - 2,7^{\circ}\text{C}$). Auch das arithmetische Mittel der Temperaturerniedrigung unter den Ausgangswert ist mit $-1,9^{\circ}\text{C}$ deutlich geringer als bei Verwendung des Mikromotors mit Schnellaufwinkelstück ($-0,9^{\circ}\text{C}$).

Bei erhöhten Kühlwassertemperaturen sind keine besonderen Unterschiede bei den Ergebnissen von Turbine und Mikromotor zu erkennen. Das arithmetische Mittel der relativen Temperaturerhöhung im Pulpakavum liegt bei der Turbinenpräparation mit $1,3^{\circ}\text{C}$ geringfügig unter dem Wert des Schnellaufwinkelstücks ($1,4^{\circ}\text{C}$). Die Messungen insgesamt weisen jedoch bei der Turbine mit relativen Temperaturerhöhungen von $0,4 - 3,0^{\circ}\text{C}$ höhere Werte auf als die entsprechenden Ergebnisse des Schnellaufwinkelstückes ($0,1 - 2,8^{\circ}\text{C}$).

4.3 Der Einfluß nicht exakt standardisierbarer Parameter auf die relative Temperaturerhöhung im Pulpakavum bei Präparation mit Turbine und Schnellaufwinkelstück

Schleifzeit, Restdentinstärke und Kühlwassertemperatur stellen nicht exakt standardisierbare Versuchsparameter dar, die nur in einem gewissen Bereich ihrer Größe vorausbestimmbar sind. Sie wurden daher bei den Schleifversuchen, die zu einer relativen Temperaturerhöhung im Pulpakavum führten, jeweils bestimmt und in Relation zu den Meßergebnissen gesetzt, um Aufschluß über einen direkten Bezug und Einfluß dieser Parameter auf die Versuchsergebnisse zu erhalten.

4.3.1 Einfluß von Kühlwassertemperatur, Schleifzeit und Restdentinstärke bei der Turbinenpräparation

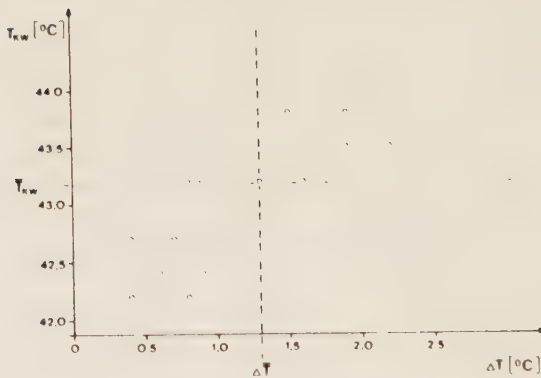


Abb. 31: Turbine:

Abhängigkeit der relativen Temperaturerhöhung
im Pulpakavum von der Kühlwassertemperatur

Schleifzeit	: 24 - 36 sec
Restdentinstärke	: 0,9 - 2,5 mm
ΔT	: relative Temperaturerhöhung im Pulpakavum in °C
$\overline{\Delta T}$	: arithmetisches Mittel von ΔT
T_{KW}	: Kühlwassertemperatur in °C
$\overline{T_{KW}}$	: arithmetisches Mittel von T_{KW}

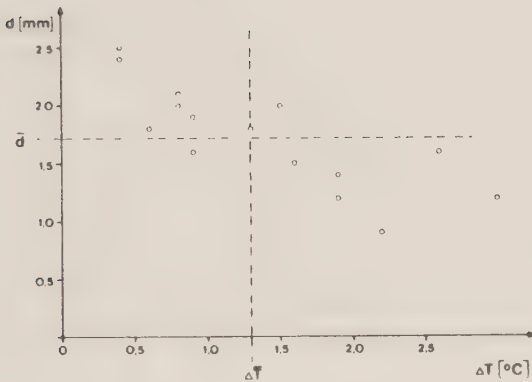


Abb. 32: Turbine:

Abhängigkeit der relativen Temperaturerhöhung
im Pulpakavum von der Restdentinstärke

Schleifzeit	: 24 - 36 sec
Kühlwassertemperatur	: 42,2 - 44,4° C
ΔT	: relative Temperaturerhöhung im Pulpakavum in °C
$\overline{\Delta T}$	: arithmetisches Mittel von ΔT
d	: Restdentinstärke in mm
$\overline{d}$	: arithmetisches Mittel von d

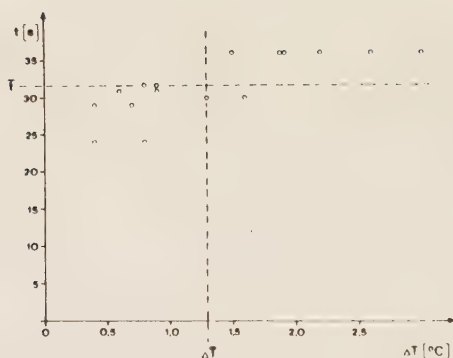


Abb.33: Turbine:

Abhängigkeit der relativen Temperaturerhöhung
im Pulpakavum von der Schleifzeit

Kühlwassertemperatur : 42,2 - 44,4° C

Restdentinstärke : 0,9 - 2,5 mm

ΔT : relative Temperaturerhöhung
im Pulpakavum in °C

$\overline{\Delta T}$: arithmetisches Mittel von ΔT

t : Schleifzeit in sec

$\overline{t}$: arithmetisches Mittel von t

Abbildung 31, 32 und 33 zeigen die Abhängigkeit der relativen Temperaturerhöhung im Pulpakavum in Bezug auf Schleifzeit, Kühlwassertemperatur und Restdentinstärke bei der Turbinenpräparation. Die Schleifzeit kann unter intermittierender Arbeitsweise dabei keinen Einfluß auf die relative Temperaturerhöhung im Pulpakavum ausüben (Abb. 33). Dagegen ist eine deutliche Abhängigkeit der gemessenen Temperaturen von der Kühlwassertemperatur und der Restdentinstärke im Bereich ihrer Variationsbreite zu erkennen. Hohe Kühlwassertemperaturen und abnehmende Restdentinstärken führen zu einer Zunahme der relativen Temperaturerhöhung im Pulpakavum (Abb. 31 und 32). Die Abweichungen von einer direkten Proportionalität lassen sich neben geringen Abweichungen durch Meßfehler über den Einfluß des jeweils anderen Parameters erklären. Das heißt: Unterschiedliche Temperaturerhöhungen im Pulpakavum werden bei gleicher Kühlwassertemperatur durch verschiedene Restdentinstärken verursacht und umgekehrt lassen sich bei gleicher Restdentinstärke unterschiedliche Meßergebnisse durch leicht variierende Kühlwassertemperaturen erklären.

4.3.2 Einfluß von Kühlwassertemperatur, Schleifzeit und Restdentinstärke bei Präparation mit dem Schnelllaufwinkelstück

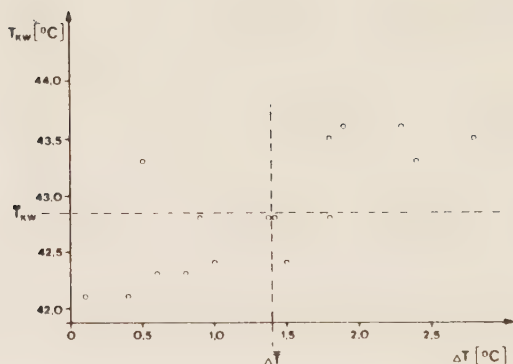


Abb. 34: Mikromotor:

Abhängigkeit der relativen Temperaturerhöhung
im Pulpakavum von der Kühlwassertemperatur

Schleifzeit	: 21 - 27 sec
Restdentinstärke	: 1,0 - 2,4 mm
ΔT	: relative Temperaturerhöhung im Pulpakavum in °C
$\overline{\Delta T}$	: arithmetisches Mittel von ΔT
T_{KW}	: Kühlwassertemperatur in °C
$\overline{T_{KW}}$	: arithmetisches Mittel von T_{KW}

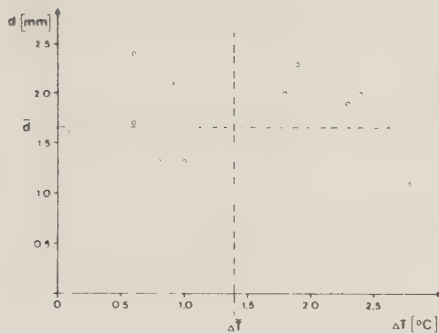


Abb. 35: Mikromotor:

Abhängigkeit der relativen Temperaturerhöhung
im Pulpakavum von der Restdentinstärke

Schleifzeit	:	21 - 27 sec
Kühlwassertemperatur	:	42,1 - 43,6° C
ΔT	:	relative Temperaturerhöhung im Pulpakavum in °C
$\bar{\Delta T}$	:	arithmetisches Mittel von ΔT
d	:	Restdentinstärke in mm
$\bar{d}$	:	arithmetisches Mittel von d

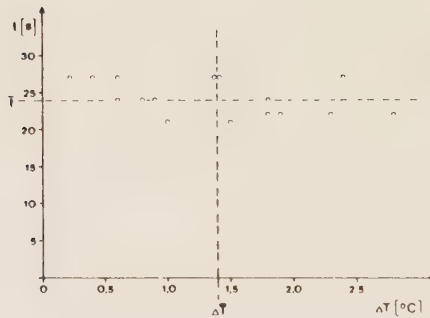


Abb.36: Mikromotor:

Abhängigkeit der relativen Temperaturerhöhung
im Pulpakavum von der Schleifzeit

Kühlwassertemperatur : 42,1 - 43,6° C

Restdentinstärke : 1,0 - 2,4 mm

ΔT : relative Temperaturerhöhung
im Pulpakavum in °C

$\overline{\Delta T}$: arithmetisches Mittel von ΔT

t : Schleifzeit

$\overline{t}$: arithmetisches Mittel von t

Bei Verwendung des Mikromotors ist lediglich eine deutliche Abhängigkeit der relativen Temperaturerhöhung von der Kühlwassertemperatur zu erkennen (Abb.34). Höhere Kühlwassertemperaturen führen dabei zu größeren Temperatursteigerungen im Pulpakavum während der Zahnpräparation. Die Restdentinstärke kann im Gegensatz zur Turbinenpräparation keinen Einfluß auf die Meßergebnisse ausüben (Abb.35). Die Schleifzeit zeigt durch die große, konstante Durchzugskraft des Mikromotors nur geringe Unterschiede. Sie beträgt 21 - 27 sec. Ein Einfluß auf die gemessene Temperaturerhöhung im Pulpakavum ist nicht zu beobachten (Abb.36).

5. DISKUSSION

5.1 Der Schleifprozess und seine Auswirkung auf die Temperatur im Pulpakavum

Seit der Entwicklung zahnärztlicher Bohr- und Schleifgeräte, die in hoch- und höchsttourige Bereiche vorstoßen, ist die Präparation eines Zahnes mit einem Risiko für die Vitalerhaltung des biologischen Systems Zahn verbunden. Die hohe Leistung der modernen Antriebseinheiten führt nicht allein zur Verrichtung von Schleifarbeit, sondern wird zu einem großen Teil auch in Wärmeenergie umgewandelt. Die Messung von Temperaturerhöhungen und ihre klinische Beurteilung stehen seitdem im Mittelpunkt vieler wissenschaftlicher Arbeiten. Die erzielten Ergebnisse sind dabei sehr vielfältig und können nur durch verschiedene Arbeitsmethoden, weiterentwickelte Gerätetechnologien und unterschiedliche Versuchsbedingungen erklärt werden. Vor allem brachten optimierte Arbeitsverfahren mit Kühlung durch ein Luft-Wasser - Spray gegenüber der trockenen oder nur mit Luftkühlung durchgeführten Präparation spürbare Verbesserungen, die zu einer geringeren Temperaturbelastung an den Zahnhartsubstanzen und im Pulpakavum führte. Die Angaben über Temperatursteigerungen im Pulpakavum bei ungekühlten Präparationsverfahren von HOFMANN (20): $7,7 - 25,0^{\circ}\text{C}$, WALTER und LEINWEBER (68): $15,0 - 20,0^{\circ}\text{C}$, HENNING und PRZETAK (19): $9,5 - 35,0^{\circ}\text{C}$, WITTROCK et al. (70): $19,0 - 29,0^{\circ}\text{C}$ und POLMAN-MOOY (50): $18,8 - 52,6^{\circ}\text{C}$ erlangen nur im Vergleich zu den jeweiligen Ergebnissen bei gekühlten Präparationsmethoden Bedeutung. Die ungekühlte Zahnpräparation ist ebenso wie die alleinige Verwendung einer Luftkühlung heute als obsolet anzusehen. Doch auch mit Wasserkühlung konnten im Pulpakavum noch Temperaturen erreicht werden, die eine kritische physiologische Grenztemperatur von $41,0 -$

42,0° C, die wir bei unseren Versuchen zugrunde legten, bei weitem überschritten. BRATSCHKO und PLISCHKA (2) konnten bereits nach 60 sec Schleifzeit mit dem Schnellaufwinkelstück maximale Temperatursteigerungen von 5,3 - 8,9° C verzeichnen. HENNING und PRZETAK (19) sowie SCHÖLER (54) beschreiben unter Verwendung des Prep-Trainers bei Turbinenpräparation eine maximale Steigerung von 6,0 - 10,0° C. Auch die Ergebnisse POLMAN-MOOYS (50) können, von einer höchsten Temperatursteigerung von 2,5 - 5,5° C ausgehend, Werte von 8,0 - 11,0° C erreichen, sobald ein Sicherheitsabstand von 0,5 mm zur Zahnpulpa unterschritten wird. Zwei- und dreistrahlige Kühlwassersprays haben bei wassergekühlten Präparationsverfahren zur Optimierung des Kühleffektes am Schleifkörper - unabhängig von der Stellung des Instrumentenschaftes zum Zahn - beigetragen. Erhöhte Spraywassermengen, intermittierende Arbeitsintervalle, die Einhaltung eines ausreichenden Sicherheitsabstandes zur Zahnpulpa und die Möglichkeit des Kontaktschleifens mit durchzugstarken Winkelstücken und Torque-Turbinen minimieren zusätzlich das thermische Trauma bei der Zahnpräparation. Unter Berücksichtigung dieser Maßnahmen, konnten EIFINGER und SCHULZ (10) bei beiden Antriebsarten einen initialen Temperaturabfall feststellen. Erst bei fortschreitender Präparation ließen sich mit steigender Vorschubkraft Temperatursteigerungen von maximal 6,5° C (Turbine) und 4,0° C (Mikromotor) erzielen. SCHUBERT (56) erreicht im in-vivo - Experiment an Hundezähnen maximale Temperatursteigerungen von 2,0 - 3,0° C. STUBEN und HOPPE (64) messen bei in-vivo-Schleifversuchen an menschlichen Zähnen je nach Schleifkörper und Kühlart Werte, die von einem Temperaturabfall von 6,0° C bis zu einer Temperaturerhöhung von 8,0° C reichen. Sie stellen dabei den bedeutenden Einfluß der Umgebungsbedingungen und des Temperaturgradienten von Kühlmedium zu Schleifobjekt fest. Wirkt Kühlluft allein auf die Kavitätenwände eines im Mund befindlichen Zahnes ein, sinkt die Temperatur am Pulpadach. Unter gleichen Bedingungen ist an extrahierten Zähnen bei Zimmer-

temperatur mit einem Temperaturanstieg im Dentin zu rechnen. Demnach müssen die Umgebungsbedingungen möglichst gut der Situation in vivo nachempfunden werden, um eine zwingende Aussagekraft der Temperaturmessungen zu erhalten. Dieses Ergebnis bestätigte die Überlegungen FUHRS (19), der den alleinigen Kühlmiteleinfluß auf verschieden vorgewärmte Zähne untersuchte. Er beobachtete, daß Zähne, die Zimmertemperatur ($20,0^{\circ}\text{C}$) aufwiesen, allein durch ein vorgewärmtes Kühlmedium eine Temperaturerhöhung im Pulpakavum erfahren. Vorgewärmte Zähne mit Mundhöhlentemperatur erfahren dagegen durch das im Verhältnis zu ihrer Eigentemperatur kühlere Spraygemisch einen Temperaturabfall, der größer ist als die maximale Temperaturerhöhung bei nicht vorgewärmten Zähnen im Schleifversuch.

Die Untersuchung des thermischen Präparationstraumas unter optimalen Umgebungsbedingungen und in Abhängigkeit von der Kühlwassertemperatur bei Turbine und Mikromotor erfolgte durch in - vitro - Temperaturmessungen im vorliegenden Experiment. Zusätzlich gelang es, den komplexen Vorgang des Temperaturverlaufs an verschiedenen Stellen in der Zahnpulpa während der Präparation darzustellen.

Die Kühlwassertemperatur sollte dabei den Empfehlungen des Geräteherstellers entsprechend $30,0 - 32,0^{\circ}\text{C}$ betragen. Messungen von MARTIN (45) an zahnärztlichen Versorgungseinheiten ergaben, daß im Durchschnitt die Systeme auf einen Bereich von $27,0 - 30,0^{\circ}\text{C}$ eingestellt sind.

Bei Kühlwassertemperaturen von $29,8 - 33,7^{\circ}\text{C}$, die deutlich sowohl unter der Pulpatemperatur von $37,0^{\circ}\text{C}$, als auch unter der Mundhöhlentemperatur von $34,0^{\circ}\text{C}$ liegen, konnte im Verlauf von drei Schleifintervallen weder mit der Turbine, noch mit dem Schnellaufwinkelstück eine relative Temperaturerhöhung im Pulpakavum über den Wert der Ausgangstemperatur registriert werden. Das Kühlspray führt zu einem initialen Temperaturabfall, der die Erwärmung des Zahnes durch nicht abzuleitende Wärmeenergie kompensiert und darüber hinaus

sogar zu einer Abkühlung im Pulpakavum führt. Bei Versuchsreihen mit jeweils 16 Meßergebnissen stellten sich mit der Turbine Temperatursenkungen von $0,7 - 3,5^{\circ}\text{C}$ und mit dem Schnellaufwinkelstück $0,0 - 2,7^{\circ}\text{C}$ unter den jeweiligen Ausgangswert ein. Eine vollständige Kronenstumpfpräparation läßt dabei keine höheren Ergebnisse erwarten, da unter optimalen Kühlbedingungen die Temperatur trotz steigender Anzahl an Schleifintervallen und gleichzeitig abnehmender Restdentinstärke abfällt, bis sich Vorkühlung und Reibungswärme an der Schleifstelle gegenseitig das Gleichgewicht halten. Selbst das versehentliche Freilegen eines Pulpahornes führte im Experiment nach dem initialen Temperaturabfall zu keiner Temperaturerhöhung, die den eingestellten, physiologischen Ausgangswert überschritt. Geringere Entfernungen der Temperaturmeßpunkte in der Zahnpulpa von der Schleifstelle führen dabei zu höheren Amplituden der Temperaturmeßkurve nach den einzelnen Schleifintervallen. Gleichzeitig wird aber auch die Wirkung des Kühleisprays verbessert, und der folgende Temperaturabfall gesteigert. Ein Gleichgewicht bleibt bei abnehmender Restdentinstärke somit erhalten, lediglich die Stärke der Erwärmung und Abkühlung an der Meßstelle nehmen an Intensität zu.

Nach langen Arbeitsphasen oder bei fehlerhaft eingestellten Geräten kann die Kühlwassertemperatur jedoch Werte über $40,0^{\circ}\text{C}$ erreichen, welche deutlich über der simulierten Pulpa- und Mundhöhlentemperatur liegen. EICHNER (8) stellt dazu fest, daß eine Kühlwassertemperatur von $37,0^{\circ}\text{C}$ keinesfalls als zu hoch anzusehen ist, sondern das Kühlproblem ausreichend löst. Er empfiehlt für das Kühlmittel Temperaturen zwischen $20,0$ und $45,0^{\circ}\text{C}$.

Die Kühlwassertemperatur wurde daher in vergleichenden Versuchsreihen gegenüber den vorausgegangenen Messungen um etwa $10,0^{\circ}\text{C}$ erhöht. Bei Werten von $42,1 - 44,4^{\circ}\text{C}$ konnte keine initiale Abkühlung des Zahnstumpfes mehr bewirkt werden. Vielfach führte das Kühlwasser allein zu einer leichten Erwärmung des Zahnes. Daraus resultieren über die Ausgangstemperatur hinaus ansteigende Temperaturmaxima in der Zahnpulpa während der einzelnen Schleifintervalle. Die gemessenen Temperaturen nehmen mit steigender Kühlwassertemperatur und bei der Turbine zusätzlich mit abnehmender Restdentinstärke zu. Es werden mit der Turbine bei Präparation einer Zahnfläche Temperatursteigerungen in der Zahnpulpa von $0,4 - 3,0^{\circ}\text{C}$ gemessen. Die Präparation mit dem Schnellaufwinkelstück führt bei etwas geringeren Schleifzeiten zu einer Temperaturerhöhung von $0,1 - 2,8^{\circ}\text{C}$. Die einzelnen Temperaturmaxima lassen sich schon ab dem ersten Schleifintervall sehr deutlich darstellen und nehmen meist mit jedem Schleifintervall an Intensität zu. Sie sind durch den initialen Temperaturabfall nicht mehr maskiert und führen somit zu steigenden absoluten Werten.

In ihrer Größenordnung kommen die Ergebnisse den maximalen Temperaturerhöhungen der in-vivo-Untersuchungen von SCHUBERT (56) sowie von STUBEN und HOPPE (64) nahe. Die Simulation des Mundhöhlenmilieus und der Pulpatemperatur gelingt somit ausreichend. Laborversuche können ebenfalls zu Vergleichszwecken herangezogen werden, wenn das Temperaturverhältnis von Schleifobjekt zu Kühlwasser ausreichend berücksichtigt wurde. Bei Arbeiten mit dem Prep-Trainer (HENNING und PRZETAK (19), SCHOLER (54), EIFINGER und SCHULZ (10)) wurde so zum Beispiel die Kühlwassertemperatur entsprechend des Temperaturunterschiedes der untersuchten Zähne von Mundhöhlen- zu Laborbedingungen gesenkt. Maximal erzielte Temperaturerhöhungen von $4,0 - 10,0^{\circ}\text{C}$ sind dabei jedoch relativ hoch zu bewerten. Selbst im Zuge einer vollständigen Kronenpräparation durften derartige Werte bei schonenden Behandlungsmaßnahmen nicht zu erreichen sein. Der größere Temperaturgradient von Kühlwasser- und Pulpatemperatur zur Spitzentemperatur an der Schleifstelle ist demnach nicht vollständig zu vernachlässigen.

Entscheidend scheint bei generellen Vergleichen mit bisherigen Temperaturmessungen auch die Art und Weise, wie die Präparation am Schleifobjekt - dem Zahn - erfolgte. So ist zum Beispiel die Geschwindigkeit, mit der der Schleifkörper am Schleifobjekt entlanggeführt wird von Bedeutung. Zügiges, intervallartiges Präparieren muß nach bisher gemachten Aussagen auch zwangsläufig ein geringeres thermisches Trauma für den Zahn nach sich ziehen. Kürzere Temperaturreize führen bei gleichgroßer abgegebener Wärmemenge zu einer kleineren Temperaturbelastung an einer größeren Fläche von Zahnhartsubstanz. Diese wird noch zusätzlich, je nach Länge der Pause zwischen den Schleifintervallen, intensiver vom Kühlspray behandelt und kann somit entsprechend besser abgekühlt werden. Die Minimierung des Präparationstraumas durch intervallartiges Bohren und Schleifen ist hinlänglich bekannt und sollte in der zahnärztlichen Praxis außer Frage stehen.

Zu den unterschiedlichen relativen Temperaturerhöhungen in der Zahnpulpa bleibt festzustellen, daß sie in Relation zu individuellen Schwankungen betrachtet werden müssen, die durch die Lage der Sonde im Pulpahorn und der für die Stärke der Zahnhartsubstanz entscheidenden Größe des Zahnes bedingt sind. Größere Entfernungen des Temperaturmeßpunktes von der Schleifstelle und stärkere Schichten an Zahnhartsubstanz bei größeren dritten Molaren führen im einzelnen Versuch zu niedrigeren Meßergebnissen. Dies erklärt auch vielfach verschieden große Temperatursteigerungen an mesialem und distalem Meßpunkt eines Zahnes, durch den unterschiedlichen Abstand der Sondenmeßspitzen von der Pulpawand. Temperaturreize wirken demnach sehr lokal am Ort ihrer Entstehung und lassen generelle Angaben für den gesamten Zahn eigentlich nicht zu. Histologische Veränderungen, die meist nur in umschriebenen Bereichen und begrenzten Bezirken auftreten, unterstützen diese These. Mitverantwortlich dürfte dabei sicherlich die geringe Wärmeleitfähigkeit bei gleichzeitig guten Wärmespeichereigenschaften von Zahnschmelz und Dentin sein. Der Zeitunterschied von 2 - 10 sec, mit dem die zwei Thermoelemente in der Pulpa eines Zahnes ihre einzelnen Temperaturmaxima erreichen, bestätigt diese Beobachtung. Das Temperaturmaximum tritt zudem mit einer Verzögerung von einigen Sekunden nach Einwirken des eigentlichen Reizes in nächster Nähe des Meßpunktes auf. Diese Verzögerung beschreibt die Zeitspanne, die für die Weiterleitung des Wärmereizes in Zahnschmelz und Dentin vom Schleifpunkt bis zur Sonden spitze benötigt wird. Eine linear zur Länge der Weiterleitungsstrecke sinkende thermische Belastung wird dabei durch die allseitige Ausbreitung und teilweise Speicherung der Wärme in den Zahnhartsubstanzen erreicht. Genaue Rückschlüsse über die Temperaturwerte an der Schleifstelle lassen sich dabei nicht exakt ziehen. MARTIN (45) beschreibt in seiner Arbeit über die Temperaturentwicklung bei der Kronenstumpfpräparation in Abhängigkeit von den verwendeten Schleifkörpern durchschnittliche Temperaturerhöhungen von

6,95° C bei der Turbine und 4,65° C beim Schnellaufwinkelstück. An der Instrumentspitzen werden Temperaturmaxima von 11,0° C (Turbine) bzw. 8,0° C (Schnellaufwinkelstück) erreicht. Diese Angaben werden den Verhältnissen der modernen Zahnpräparation sicher besser gerecht als Messungen LANGE LANDS (33) mit Temperaturen von 700 - 900° C an der Schleifstelle oder HOFMANNS (21), der 290° C - in Dentinbrandmarken sogar 600° C - bei noch ungekühlter Turbinenpräparation gemessen hat.

Mit Größe und Zeitdauer läßt sich der thermische Reiz auf die Zahnpulpa im vorliegenden Experiment sehr gut erfassen. Es werden lokal Temperaturmaxima erreicht, die in ihrer Summation zu einer Schädigung von Zellstrukturen in der Zahnpulpa führen können. Mit diesen Ergebnissen könnte im histologischen Zellexperiment unter Anwendung des aufgezeigten Reizmusters die thermische Schädigung untersucht werden, um zu einer Abgrenzung gegenüber mechanischen Läsionen und Ultraschallschädigungen zu gelangen.

5.2 Bewertung der Anwendung von Turbine und Mikromotor in der zahnärztlichen Praxis

Turbine und Mikromotor wurden bezüglich ihrer schädlichen Wirkung für den Zahn seit ihrer Einführung in der zahnärztlichen Praxis unterschiedlich beurteilt. Dabei trug der Stand ihrer Bewertung vor allem dem technischen Standard und der Weiterentwicklung beider Antriebseinheiten Rechnung. Mit der Turbine war erstmals ein Eindringen in bis dahin unerreichte Drehzahlbereiche möglich, das ohne zusätzliche Kühlmethoden ein hohes Risiko für die Vitalerhaltung des Zahnes mit sich brachte. Die alleinige Luftkühlung des Turbinenantriebs war zwar anderen Präparationsmaßnahmen ohne jegliches Kühlmedium überlegen, doch bei gleichzeitiger Anwendung eines Wasserkühlgemisches konnten mit dem Mikromotor bei geringeren Drehzahlen auch niedrigere Temperaturen bei Schleifversuchen erzielt werden. Hohe Übersetzungswinkelstücke des elektronisch geregelten Mikromotors bis 180 000 U/min, sowie optimierte Kühlvorrichtungen beider Systeme mit Zwei- und Dreidüsensprays ließen keine eindeutige Stellungnahme mehr zu. Es besteht daher die Frage, ob bei einem schonenden Präparationsverfahren mit der Turbine nur Zahnschmelz abgetragen werden soll, um pulpanah am Dentin mit dem Mikromotor zu arbeiten, oder ob mit beiden Antrieben alle Schleifarbeiten ausgeführt werden können. Die Unterschiede beider Antriebseinheiten in ihrer Anwendung sollen dazu bei den unterschiedlichen Versuchsbedingungen im in-vitro - Experiment dargestellt werden, um dieses Problem vollständig zu analysieren.

Eine hohe klinische Relevanz wurde erreicht, da in bestmöglicher Weise versucht wurde, die in-vivo - Bedingungen der zahnärztlichen Behandlung zu simulieren. Als Schleifobjekt dienten frisch extrahierte dritte Molaren, die zur Konservierung zwischen Extraktion und Versuchsbeginn in isotonischem Milieu lagerten. Die Pulpa wurde nicht entfernt. Sie

sollte die ursprüngliche Wärmeleitfähigkeit im Pulpakavum gewährleisten. Die Umgebungsbedingungen berücksichtigten eine physiologische Pulpatemperatur von $37,0^{\circ}\text{C}$ bei einer Toleranz von $\pm 0,4^{\circ}\text{C}$ über Einbettung des Zahnes in einem vorgewärmten semisoliden Medium während der Zahnpräparation und eine Mundhohlentemperatur von $34,0^{\circ}\text{C}$ mit $\pm 0,5^{\circ}\text{C}$ Toleranz durch Isolierung des Versuchsaufbaus in einem durch Heißluft erwärmten Plexiglasgehäuse. Alle technischen Versorgungsparameter wurden ständig kontrolliert und entsprechend bisheriger Erkenntnisse zur Minimierung des thermischen Präparationstraumas eingestellt.

Eine große Anzahl von Versuchen durchzuführen, war bei den umfangreichen Vorbereitungen der einzelnen Messungen nicht möglich. Bei dem individuellen Spielraum der extrahierten Molaren bezüglich Größe, Form und Mineralisationsgrad, konnte es auch nicht als wichtigstes Ziel und Kriterium gesehen werden, bei den Temperaturmessungen einen exakten Durchschnittswert aus einer Vielzahl von Messungen zu ermitteln. Die Ergebnisse sollen vielmehr als Einzelaussagen über die erbrachte Schleifleistung und die dabei in der Zahnpulpa der jeweiligen Zähne entstehenden Temperaturen dienen und Vergleiche mit bisherigen Temperaturmessungen ermöglichen.

Eine Einschränkung muß bei den Meßergebnissen nur insofern gemacht werden, als technisch keine vollständige Kronenpräparation an den extrahierten Molaren durchgeführt werden konnte. Die Präparation beschränkte sich auf eine Seitenfläche der Versuchszähne, da ein schneller Wechsel in der Schnellspannvorrichtung nicht durchgeführt werden konnte. Eine Beurteilung der thermischen Belastung ist jedoch auch bei geringen Schleifleistungen möglich, da die Entwicklung des Temperaturverlaufs bei zunehmender Schleifzeit auch für umfangreichere Präparationen interpretiert werden kann.

Bei Kühlwassertemperaturen von 29,8 - 33,7° C sind deutliche Unterschiede in der Anwendung von Turbine und Mikromotor festzustellen. Alle Versuchsergebnisse beider Antriebe weisen zwar eine Senkung der Temperatur im Pulpakavum auf, doch fällt diese bei der Turbine insgesamt deutlicher aus. Das arithmetische Mittel der Meßergebnisse liegt mit -1,9° C um 1,0° C unter dem Wert des Mikromotors von -0,9° C. Die Maximalwerte reichen knapp an die Ausgangstemperaturen heran und können sie bei Präparation mit dem Mikromotor sogar erreichen. Verantwortlich dafür ist wohl die stärkere Sprayluftzufuhr aus der Antriebsluft der Turbine und ein daraus resultierender besserer Spraynebel. Die klinische Relevanz dieser Beobachtung bleibt jedoch eher unbedeutend, da es sich in beiden Fällen um Temperatursenkungen unter den Ausgangswert handelt. Von einer Schädigung des biologischen Systems kann also nicht gesprochen werden.

Eine veränderte Situation findet sich bei Kühlwasserwerten über 40,0° C. Die schädigende Wirkung der unerwünschten Wärmeenergie beim Materialabtrag tritt in den Vordergrund. Die Kühlsysteme von Turbine und Mikromotor arbeiten dabei gleichermaßen effektiv. Das arithmetische Mittel von 1,3° C bei der Turbine und 1,4° C beim Mikromotor erscheint nahezu gleich. Die maximalen Temperaturerhöhungen erreichen jedoch bei der Turbine vereinzelt höhere Werte als die Meßergebnisse des Mikromotors. Konstantere und durchschnittlich kürzere Schleifzeiten des geregelten Antriebs dürften dabei mitverantwortlich für gleichmäßigere Temperaturmaxima des Mikromotors sein. Die höhere Schleifleistung verursacht zugleich die im Mittel etwas höheren Temperaturwerte im Vergleich zur Turbinenpräparation. Die Gefahr einer Schädigung der Zahnpulpa besteht bei relativen Temperaturerhöhungen von 0,4 - 3,0° C (Turbine) bzw. 0,1 - 2,8° C (Mikromotor) in gleicher Weise. Höhere Maximalwerte der Turbinenpräparation bei geringer Restdentinstärke bedeuten jedoch eine geringere thermische Belastung für den Zahnstumpf bei Verwendung des

Mikromotors, speziell in pulpanahen Bereichen. Diese Aussage findet ihre Bestätigung, wenn man die relative Temperaturerhöhung beider Antriebssysteme in Relation zu den Parametern Kühlwassertemperatur, Schleifzeit und Restdentinstärke setzt. Während bei beiden Antriebssystemen eine direkte Abhängigkeit von der Kühlwassertemperatur besteht (Abb. 36 und 39), läßt sich eine Wechselwirkung von abnehmender Restdentinstärke und höheren Pulpaschädigungen während der Präparation nur bei der Turbine feststellen (Abb. 38). Der Mikromotor mit Schnellaufwinkelstück zeigt keinerlei Gesetzmäßigkeiten dieser Größen (Abb. 41). Ebenfalls läßt sich keine Abhängigkeit beider Antriebssysteme von der jeweils benötigten Schleifzeit verzeichnen (Abb. 37 und 40).

Zusammenfassend läßt sich im Vergleich von Turbine und Mikromotor feststellen: Eine Gefährdung für die Pulpa durch Temperaturereize besteht bei beiden Antriebssystemen nicht, sofern die Temperatur des Kühlwassers hinreichend niedrig ist und nicht durch Dauerbetrieb oder fehlerhaft aufeinander abgestimmte Instrumentkombinationen Werte von $35,0^{\circ}\text{C}$ überschreitet. Werden höhere Kühlwassertemperaturen erreicht, besteht bei beiden Antriebssystemen akute Gefahr zur irreversiblen Pulpaschädigung. Dabei können vor allem pulpanah mit der Turbine hohe Temperaturen erreicht werden. Hier ist nach wie vor die Anwendung des Schnellaufwinkelstückes zu bevorzugen. Zu empfehlen ist die Kombination beider Antriebe, da sie zudem mit kürzeren Arbeitszeiten am einzelnen Gerät automatisch vor der Gefahr schützt, im Dauerbetrieb Kühlwassertemperaturen von mehr als $40,0^{\circ}\text{C}$ zu erreichen. Insgesamt betrachtet, muß die Turbine als Präparationsinstrument jedoch günstiger beurteilt werden als in früheren Untersuchungen. Das liegt vor allem an vielen technischen Weiterentwicklungen in den letzten Jahren. Mit Erreichen höherer Durchzugskräfte und effektiverer Kühlsysteme, die auch zur Verbesserung des Mikromotors beitrugen, kann sie einen Einsatzbereich erlangen, der gegenüber dem geregelten

unwesentlich eingeschränkt ist. Die geringeren Vorschubkräfte in der Anwendung der Turbine werden dabei von Patient und Zahnarzt meist angenehmer empfunden. Beide Geräte stellen keine Alternativen zueinander dar, sondern sollten sich in optimaler Anwendung ergänzen.

5.3 Bedeutung der Kühlwassertemperatur beim Schleifprozess

Der Kühlwassertemperatur ist bei der Zahnpräparation eine besondere Bedeutung beizumessen. Änderungen ihrer Größe, von minimal bis maximal erreichbaren Werten in einem Bereich von $30,0 - 45,0^{\circ} \text{C}$, können bei Turbine und Mikromotor einen völlig veränderten Temperaturverlauf im Pulpakavum während der Zahnpräparation zur Folge haben. Auch geringe Schwankungen der Kühlwassertemperatur beeinflussen bereits die Meßergebnisse beider Antriebsarten ganz erheblich. Abbildung 31 und 34 zeigen bei Versuchen mit Kühlwassertemperaturen über $40,0^{\circ} \text{C}$ eine starke Abhängigkeit der relativen Temperaturerhöhung im Pulpakavum von der Kühlwassertemperatur. Mit je $1,0^{\circ} \text{C}$ höheren Wassertemperaturen sind auch etwa $1,0^{\circ} \text{C}$ höhere Pulpatemperaturen zu erreichen. Die Schleifzeiten der in-vitro - Experimente betragen dabei 20 - 35 sec. Wesentlich größere thermische Probleme sind für eine Kronenstumpfpräparation zu erwarten.

Zieht man diese Ergebnisse in Betracht, muß man feststellen, daß der Kühlwassertemperatur im Vergleich zu vielseitigen Untersuchungen des Kühlsystems oder der Antriebseinheit nicht immer die ihr zustehende Rolle beigemessen wurde. So sind für Sprayführung, Wassermenge und Kühlluft, sowie Drehzahl und Vorschubkraft aufgrund vieler wissenschaftlicher Untersuchungen optimale Werte ermittelt worden. Alleinige Änderung der Kühlwassertemperatur führt jedoch auch bei konstanten Werten der anderen Parameter zu erheblichen Unterschieden bei den Temperaturmessungen im Pulpakavum. Sie hat für die thermische Belastung des Zahnes bei der Präparation eine größere Bedeutung als die Entscheidung zwischen hoch- und höchsttourigem Antrieb, da ähnliche Temperaturverläufe bei Turbine und Mikromotor aufgezeichnet wurden. Die Kühlwassertemperatur kann dabei sehr leicht über die Vorwärmung im Vorratsbehälter der Dentaleinheit reguliert werden. Lediglich die konstante Beibehaltung dieser Temperatur während langer Arbeitsphasen bereitet Schwierigkeiten.

Die Empfehlungen führender Herstellerfirmen liegen in einer Größenordnung von $30,0 - 32,0^{\circ}\text{C}$ (KaVo) und $37,0^{\circ}\text{C}$ (Siemens und Micro-Mega). Erwärmung des gesamten Zuleitungssystems bei Dauerbetrieb, speziell in Verbindung mit lichtführenden Turbinen und Winkelstücken, die zusätzlich Wärme auf die Wasserzuleitung ausstrahlen, können zur Überschreitung dieser Temperaturen führen. Diese Gefahr besteht insbesondere, wenn Schnellaufwinkelstück und zahnärztliche Einheit nicht ausreichend aufeinander abgestimmt sind - das heißt, wenn das Winkelstück mit Kühlwasser höherer Temperaturen versorgt wird, als es zu seiner eigenen Kühlung benötigt. Eine demzufolge verstärkte Eigenerwärmung führt zu einer zusätzlichen Erhöhung der Temperatur des Kühlwassers bei der Durchleitung. Dadurch läßt sich auch die übermäßige Erhitzung von Schnellaufwinkelstücken erklären, die nicht durch die hohen Drehzahlen oder Lagerschäden "heiß laufen", sondern mit Kühlwasser versorgt werden, das der eigenen Kühlung durch zu hohe Wassertemperaturen nicht genügen kann. Ein Lagerschaden tritt oft erst als Folge zu hoher Eigentemperaturen auf. Die Verwendung eines KaVo INTRA K-Motors 186 B mit Übersetzungswinkelstück 24B in Verbindung mit einer Siemens M 1 Einheit brachte bei Messungen an zahnärztlichen Versorgungseinheiten die höchste Temperatur des Kühlwassers von $45,1^{\circ}\text{C}$ nach acht jeweils 30 sec dauernden Arbeits- und Pausenintervallen. Temperaturen von $38,0 - 40,0^{\circ}\text{C}$ stellten sich im Dauer- und Intervallbetrieb bei vielen Geräten ein. Um diese Temperaturen nicht unerreichbar hoch erscheinen zu lassen, sei an dieser Stelle nochmals vermerkt, daß die Wassertemperaturen am Eingang des Instrumentenschafes gemessen wurden. Im Spraynebel ergeben sich Werte, die in Abhängigkeit von der Sprayluftzufuhr um $2,0^{\circ}\text{C}$ tiefer liegen (KLOS und ROTKE (32)).

Die unterschiedlichen Kühlwassertemperaturen, die nach FUHR (19) sowie STUBEN und HOPPE (64) immer in Relation zu den Umgebungsbedingungen zu setzen sind, geben eine mögliche Erklärung für die vielen verschiedenen Ergebnisse vorausgegangener Untersuchungen. Dabei wurden Empfehlungen mit Kühlwassertemperaturen von $19,0^{\circ}\text{C}$ (DAHL (6)) bis hin zu unbedenklich erklärten Werten von $45,0^{\circ}\text{C}$ (EICHNER (9)) ausgesprochen. Zu niedere Kühlwasserwerte lassen sicherlich Mißempfindungen an den Zähnen auftreten, die als Dauerreiz vom Patienten nicht toleriert werden. Aber auch zu hohe Temperaturen sind nach den vorliegenden Ergebnissen unbedingt zu vermeiden. Die Gefahr eine Temperatur von $41,0 - 42,0^{\circ}\text{C}$ zu überschreiten, bei der eine Schädigung der Pulpa erfolgen kann, ist dabei um so größer je höhere Kühlwasserwerte erreicht werden. Wenn die Pulpatemperatur bereits nach weniger als 30 sec Schleifzeit auf Werte von $40,0^{\circ}\text{C}$ steigen kann (Abb.23), besteht kaum ein Zweifel einer irreversiblen Schädigung bei umfangreicheren Präparationsmaßnahmen. Dabei muß neben den kurzen Schleifzeiten auch berücksichtigt werden, daß die in-vitro - Experimente nur an dritten Molaren - also relativ großen Zähnen - durchgeführt wurden. Um eine thermische Beeinträchtigung oder Schädigung von wesentlich kleineren Prämolaren oder Frontzähnen bei der Präparation, insbesondere der Kronenstumpfpräparation, auszuschließen, müssen Temperaturen, die über $35,0^{\circ}\text{C}$ hinausgehen, vermieden werden. Die Kontrolle der Kühlwassertemperatur erscheint dabei für den Zahnarzt mindestens ebenso wichtig, wie die Einhaltung aller anderen Parameter, die zur Minimierung des Präparationstraumas beitragen.

6. ZUSAMMENFASSUNG

Es wurde in Abhängigkeit von Antriebsart und Kühlwassertemperatur die thermische Belastung für den Zahn bei hoch- und höchsttouriger Präparation untersucht. Bei unversehrten, frisch extrahierten dritten Molaren wurde an zwei verschiedenen Stellen im Pulpakavum der Temperaturverlauf über Mantelthermoelemente in Abhängigkeit von drei gleichmäßigen Schleifintervallen aufgezeichnet. Eine Pulpatemperatur von $37,0^{\circ}\text{C}$ und eine Umgebungstemperatur von $34,0^{\circ}\text{C}$ konnten die Situation in vivo möglichst exakt nachempfinden. Die Versorgungsgrößen für Antrieb und Kühlung wurden ebenso wie die angewandte Vorschubkraft und die abzutragende Schichtstärke auf optimierte Werte eingestellt, die nach bisherigen Untersuchungen das Präparationstrauma minimieren sollten.

Die Ergebnisse dokumentieren, daß der Kühlwassertemperatur eine besondere Bedeutung bei der Zahnpräparation zukommt. Sie sollte $35,0^{\circ}\text{C}$ nicht überschreiten, um schädigende Temperaturen in der Zahnpulpa zu vermeiden. Bei Kühlwassertemperaturen von $29,8 - 33,7^{\circ}\text{C}$ konnte im Experiment unter Verwendung beider Antriebsarten keine thermische Irritation der Zahnpulpa erreicht werden. Nach einem initialen Temperaturabfall ergaben sich maximal Temperaturen, die bei der Turbine $0,7 - 3,5^{\circ}\text{C}$ (arithmetisches Mittel $-1,9^{\circ}\text{C}$) und beim Mikromotor $0 - 2,7^{\circ}\text{C}$ (arithmetisches Mittel $-0,9^{\circ}\text{C}$) unter der Ausgangstemperatur lagen. Der Unterschied ist durch den besser wirksamen Spraynebel der Turbine zu erklären, der aus der höheren Sprayluftmenge durch die Antriebsluft resultiert.

Nach längeren Arbeitsphasen können jedoch bei fehlerhaft abgestimmten Kombinationen von Instrument und Versorgungseinheit und in Verbindung mit Lichtleitern Temperaturen über $40,0^{\circ}\text{C}$ erreicht werden, die zu einer Temperaturerhöhung im Pulpakavum führen. Diese Gefahr wird beim Mikromotor mit Schnellaufwinkelstück durch die in den Übersetzungslagern entstehende Reibungswärme zusätzlich erhöht. Bei Kühlwassertemperaturen von $42,1 - 44,4^{\circ}\text{C}$ und Schleifzeiten von 21 - 36 sec wurden in etwa gleiche relative Temperaturerhöhungen

von 0,4 - 3,0° C (arithmetisches Mittel 1,3° C) für die Turbine und 0,1 - 2,8° C (arithmetisches Mittel 1,4° C) für den Mikromotor gemessen.

Umfangreichere Präparationsmaßnahmen als im Experiment sowie die Präparation morphologisch kleinerer Zähne können zur Überschreitung der physiologischen Grenztemperatur von 41,0-42,0° C führen und eine Schädigung der Pulpa verursachen. Die thermische Belastung steigt dabei intervallweise mit jedem Schleifvorgang an. Die Temperaturmaxima wirken jeweils sehr kurzfristig auf die topographisch nächstliegenden Pulpazonen. Ein Einfluß der Restdentinstärke auf die gemessenen Pulpas Temperaturen war nur bei der Turbine zu beobachten. In Pulpanahe empfiehlt es sich daher, vorzugsweise den Mikromotor mit Schnellaufwinkelstück zu verwenden.

7. LITERATUR

- 1 Bleicher, P.: Bohren und Schleifen. Quintess Zahnärztl Lit 32, 1033-1044 (1981).
- 2 Bratschko, R. und Plischka, G.: Klinische Ergebnisse einer verbesserten Schleifkörpertechnologie. Quintess Zahnärztl Lit 33, 1065-1076 (1982).
- 3 Carson, J., Rider, T. and Nash, D.: A thermographic study of heat distribution during ultra-speed cavity preparation. J Dent Res 58, 1681-1684 (1979).
- 4 Cooley, R. and Barkmeier W.: Temperature rise in the pulp chamber caused by twist drills. J Prost Dent 44, 426-429 (1980).
- 5 Cooley, L., Wayne, W. und White, J.: Die Wärmeentwicklung beim Polieren von Füllungen. Quintess Zahnärztl Lit 32, 1821-1832 (1981).
- 6 Dahl, B.: Dentine and pulp reactions to fullcrown preparation procedures. J Oral Rehab 4, 247-254 (1977).
- 7 Dahlin, J.: Optimale Präparationen - rationell ausgeführt (1). Quintess Zahnärztl Lit 32, 1821-1832 (1981).
- 8 Eichner, K.: Ergebnisse wissenschaftlicher Untersuchungen zum hoch- und höchsttourigen Bohren und Schleifen. Dtsch Zahnärztl Z 15, 192-209 (1960).
- 9 Eichner, K.: Normal-, hoch- und höchsttouriges Bohren und Schleifen. Wissenschaftliche Untersuchungen und klinische Folgerungen. Dtsch Zahnärztl Z 18, 114-123 (1963).

- 10 Eifinger, F. und Schulz, R.-P.: Temperaturmessungen im Pulpa-
kavum während der Onlay- und Inlaypräparation. Schweiz
Mschz Zahnheilk 89, 1239-1249 (1979).
- 11 Fechner, U.: Temperaturmessungen an Zahnhartsubstanzen beim
normal-, hoch- und höchsttourigen Bohren (Fräsen). Dtsch
Zahnärztl Z 18, 135-146 (1963).
- 12 Fibig, K.: Untersuchungen über die Wärmeentwicklung bei Boh-
rern unterschiedlicher Abnutzungsgrade. Dtsch Zahnärztl Z
30, 14-19 (1975).
- 13 Fuhr, K.: Vergleichende Untersuchungen über die Temperatur-
verhältnisse beim zahnärztlichen Bohren und Schleifen.
Dtsch Zahnärztl Z 18, 986-991 (1963).
- 14 Gängler, P.: Das Verhalten der Blutzirkulation der Pulpa
auf thermische Reize. Dtsch Zahn Mund Kieferheilk 64,
480-486 (1976).
- 15 Garnier, M. und Hohmann, E.: Die Elektro - Kleinstbohr-
maschine, ein neuer Nieder- und Mitteltourenantrieb.
Zahnärztl Welt 67, 16 (1966).
- 16 Göhlich, C.: Grundlagen der Super - High - Speed -
Präparationstechnik unter Berücksichtigung der Luftturbine
des amerikanischen Zahnarztes Dr. John V. Borden.
Zahnärztl Rdsch 66, 505 (1957).
- 17 Grüsser, O.-J., Kollmann, W., Lerch, J. and Mijatovic, E.:
Changes in pulp temperature during thermostimulation of
human teeth by a simple electrically controlled thermode
Pflügers Arch 403, 273-277 (1985).
- 18 Harndt, R.: Ist die Turbinenpräparation noch akzeptabel.
Dtsch Zahnärztl Z 37, 427-432 (1982).

- 19 Henning, G. und Przetak, C.: Der Prep - Trainer; thermische Kontrolle im Pulpenraum. Dtsch Zahnärztl Z 30, 204-206 (1975).
- 20 Hofmann, M.: Die Temperaturentwicklung im Pulpenkavum beim Beschleifen der Zähne. Dtsch Zahnärztl Z 14, 472-478 (1959).
- 21 Hofmann, M.: Die Temperaturentwicklung im Pulpenkavum und an der Schnittfläche bei der Präparation der Zahnhartsubstanzen unter Verwendung der Turbine. Dtsch Zahnärztl Z 16, 584-590 (1961).
- 22 Hoppenbrouwers, P.: The effect of cavity preparation on the metabolism of protein in dentin. J Dent Res 61, 1035-1038 (1982).
- 23 Hord, A.: Pulp protection in restorative procedures. Ont Dent 53, 7-11 (1976).
- 24 Internationales Institut für zahnärztliche Praxisführung: Präparationstrauma durch zu geringe Spraywassermenge. Schweiz Mschr Zahnheilk 93, 192 (1983).
- 25 Kerschbaum, T. und Voß, R.: Die praktische Bewährung von Krone und Inlay. Dtsch Zahnärztl Z 36, 243-249 (1981).
- 26 Ketterl, W.: Studie über das Dentin der permanenten Zähne des Menschen. Stoma 14, 79-96 und 148-163 (1961).
- 27 Kirschner, H.: Experimentelle und klinische Erfahrungen mit einer automatischen Kühlmethode bei zahnärztlich chirurgischen Behandlungen (1 und 2). Quintess Zahnärztl Lit 29, 13-19 und 25-30 (1978).

- 28 Kirschner, H., Bolz, U. und Michel, G.: Thermometrische Untersuchungen mit innen- und ungekühlten Bohrern an Kieferknochen und Zähnen. Dtsch Zahnärztl Z 39, 30-32 (1984).
- 29 Klaiber, B., Eibofner, E., Gleinser, A. und Lingenhöle, B.: Der Kühleffekt verschiedener Spraysysteme bei Turbine und Schnellaufwinkelstück. Dtsch Zahnärztl Z 40, 1194-1197 (1985).
- 30 Klötzer, W.: Tierexperimentelle Prüfung von Materialien und Methoden der Kronen- und Brückenprothetik. Med Habilschr, Tübingen 1971.
- 31 Klötzer, W.: Die traumatische Schädigung der Pulpa bei der Überkronung. Dtsch Zahnärztl Z 39, 791-794 (1984).
- 32 Klos, H. und Rottke, R.: Experimentelle Untersuchungen zum Temperaturproblem beim höchsttourigen Bohren und Schleifen mit Turbinengeräten. Dtsch Zahnärztl Z 15, 1661-1679 (1960).
- 33 Langeland, K.: Pulp reactions to cavity preparation and to burns in the dentin. Odont T 68, 463 (1960).
- 34 Lauer, H.-Ch.: Temperaturänderungen an der Wurzelhaut bei extraoraler Präparation von Molaren für die Replantation. Dtsch Zahnärztl Z 39, 887-891 (1984).
- 35 Lauer, H.-Ch.: Eine Vorrichtung zur extraoralen Präparation von Zähnen für die Replantation. Dtsch Zahnärztl Z 40, 850-852 (1985).
- 36 Lauer, H.-Ch.: Experimentelle Untersuchungen zur Wärmeentwicklung im Pulpakavum durch Kunststoffprovisorien. Dtsch Zahnärztl Z 41, 468 - 472 (1986).

- 37 Lenz, P. und Gilde, W.: Temperaturverlauf in Pulpakaven bei Schmelzversiegelung mit Laserstrahlen. Dtsch Zahnärztl Z 33, 623-628 (1978).
- 38 Lindholm, K.: Effects of crown preparation on dental pulp arteriole. Proc Finn Dent Soc 71, 10-14 (1975).
- 39 Lingenhölle, B.: Mündliche Mitteilungen 1985/86.
- 40 Lloyd, B., Rich, J. and Brown, W.: Effect of cooling techniques on temperature control and cutting rate for high-speed dental drills. J Dent Res 75, 675-684 (1978).
- 41 Lübke, A.: Experimentelle Untersuchungen über die Wärmeleitfähigkeit der Zahnhartsubstanzen und verschiedener Füllungswerkstoffe. Med Diss, Kiel 1961.
- 42 Maeda, T., Stoltze, K., User, A., Kroone, H. and Brill, N.: Oral temperatures in young and old people. J Oral Rehab 6, 159 - 166 (1979).
- 43 Maeglin, B.: Auswirkungen der Kavitätenpräparation mit höchsten Geschwindigkeiten in histologischen Untersuchungen. Schweiz Mschr Zahnheilk 70, 877-881 (1960).
- 44 Marsland, E. and Skovelson, D.: The effect of cavity preparation on the human dental pulp. Br Dent J 102, 213 (1957).
- 45 Martin, H.: Vergleichende Untersuchung über die Temperaturentwicklung und die Schleifleistung von Turbine und Mikromotor mit Schnellaufwinkelstück bei der Kronenstumpfpäparation. Med Diss, Freiburg 1983.
- 46 Musil, R.: Rationelle Verfahren der Kronenpräparation. Stomatol DDR 27, 552-555 (1977).

- 47 Nentwig, G.: Die Kronenpräparation unter Berücksichtigung der zur Zeit erhältlichen Präparationssätze. Med Diss, Köln 1978.
- 48 Nentwig, G.: Beitrag zur systemmatischen Kronenpräparation (1). Quintess Zahnärztl Lit 32, 277-284 (1981).
- 49 Pohto, M. and Scheinin, A.: Microscopic observations on living dental pulp. Acta Odont Scand 16, 315-327 (1958).
- 50 Polman-Mooy, A.: Temperaturmessungen in Zahnhartsubstanzen beim normal-, hoch- und höchsttourigen Schleifen. Dtsch Zahnärztl Z 18, 130-135 (1963).
- 51 Rateitschak, K., König, K. und Mühlemann, H.: Histologische Pulpareaktionen auf hoch- und höchsttourige Kavitätenpräparation. Schweiz Mschr Zahnheilk 69, 477-487 (1959).
- 52 Richter, J. und Stüben, J.: Ein Beitrag zur Temperaturmessung im Zahn und experimentelle Untersuchungen über die Temperaturleitfähigkeit des Zahnhartgewebes sowie verschiedener zahnärztlicher Zemente und Kunststoffe. Dtsch Zahnärztl Z 17, 477-486 (1962).
- 53 Sauerwein, E.: Zahnerhaltungskunde, Bohren und Schleifen. Georg Thieme Verlag, Stuttgart 1970.
- 54 Schöler, A.: Untersuchungen der thermischen Belastung der Pulpa bei Dentinpräparationen in vitro mit luft- und kugelgelagerten Turbinen. Zahnärztl Rdsch 87, 1127-1128 (1978).
- 55 Schöler, A.: Überlegungen, Analysen und praktische Erkenntnisse zur Kronenstumpfpräparation (2). Quintess Zahnärztl Lit 31, 47-53 (1980).

- 56 Schubert, L.: Temperaturmessungen im Zahn während des Schleif- und Bohrvorgangs mittels des Lichtstrichgalvanometers. Zahnärztl Welt 58, 443-445 (1957).
- 57 Schuchard, A.: A histologic assessment of low-torque, ultrahigh-speed cutting technique. J Prost Dent 34, 644-651 (1975).
- 58 Schuchard, A.: Pulpal response to cooling armamentaria at ultrahigh speed. J Prost Dent 41, 58-62 (1979).
- 59 Seale, N., McIntosh, J. and Taylor, A.: Pulpal reactions to bleaching of teeth in dogs. J Dent Res 60, 948-953 (1981).
- 60 Simon, U.: Vergleichende Messungen von handelsüblichen Bohrmaschinen und Turbinen. Dtsch Zahnärztl Z 34, 768-772 (1979).
- 61 Spierings, T., Peters, M. and Plasschaert, A.: Thermal trauma to teeth. Endod Dent Traumatol 1, 123-129 (1985).
- 62 Stambaugh, R. and Wittrock, J.: The relationship of the pulp chamber to the external surface of the tooth. J Prost Dent 37, 537-546 (1977).
- 63 Stüben, J. und Hoppe, W.: Experimentelle Untersuchungen über die Temperaturveränderung in der Zahnhartsubstanz beim höchsttourigen Bohren und Schleifen. Dtsch Zahnärztl Z 17, 477-486 (1962).
- 64 Stüben, J. und Hoppe, W.: Experimentelle Untersuchungen über die Veränderungen der Pulpa nach normal- und höchsttourigem Schleifen und Bohren im histologischen Bild. Dtsch Zahnärztl Z 19, 601-611 (1964).

- 65 Swerdloff, H. and Stanley, H.: Reaction of the human dental pulp to cavity preparation. J Prost Dent 9, 121 (1959).
- 66 Takahashi, N.: Thermal conductive analysis of restored teeth by finite element method. J Oral Rehab 9, 83-88 (1982).
- 67 Wallace, G., Barkmeier, W. and Cooley, R.: Effects of cavity preparation on the dental pulp. Ill Dent J 47, 16-18 (1978).
- 68 Walter, H. und Leinweber, G.: Messung mit Thermoelementen im Pulpenkavum extrahierter Zähne bei Airotor-Präparation. Schweiz Mschr Zahnheilk 70, 415-423 (1960).
- 69 Walther, W., Klaiber, B. und Heners, M.: Vergleichende histologische Untersuchungen nach Präparation mit unterschiedlichen Techniken. Dtsch Zahnärztl Z 39, 787-790 (1984).
- 70 Wittrock, J., Morratt, G. and Davies, E.: A study of temperature changes during removal of amalgam restorations. J Prost Dent 34, 179-186 (1975).
- 71 Zach, L. and Cohen, G.: Pulp response to externally applied heat. Oral Surg 19, 515-530 (1965).

Danksagung

Besonders danke ich Herrn Priv.- Doz. Dr. H.- Ch. Lauer für die Überlassung des Themas sowie für die intensive Unterstützung und fachliche Beratung bei der Erstellung dieser Arbeit.

Herrn Prof.Dr. E.Kraft danke ich herzlich für die fachlichen Anregungen. Mein Dank an ihn gilt insbesondere auch dafür, daß er es mir ermöglichte, diese Untersuchungen an der Poliklinik für Zahnärztliche Prothetik durchzuführen.

Mein Dank gilt ebenso Herrn Lingenhöle und Herrn Eibofner von der Abteilung Entwicklung und Forschung der Firma KaVo, Biberach, für die Bereitstellung technischer Geräte und Ihre Hilfe bei Aufbau und Durchführung der Schleifversuche.

Ebenso möchte ich Herrn Prof.Dr. Müller - Mohnssen und Herrn Dr. Tippe von der Abteilung Physiologie der Gesellschaft für Strahlen- und Umweltforschung in München für Ihre Unterstützung und Beratung bei der Ausarbeitung eines brauchbaren Temperaturmessungs - und Temperaturaufzeichnungsverfahrens danken.

LEBENS LAUF

Am 24. April 1961 wurde ich als Sohn des Ehepaares Dr. Georg und Irene Rothlauf in München geboren.

Von 1967 bis 1971 besuchte ich die Volksschule an der Plinganserstraße, anschließend das Klenze-Gymnasium in München und legte dort das Abitur im Mai 1980 ab.

Im September 1980 immatrikulierte ich mich an der Ludwig-Maximilians-Universität in München im Studienfach Zahnheilkunde. Der naturwissenschaftlichen Vorprüfung habe ich mich im Oktober 1981, der zahnärztlichen Vorprüfung im April 1983 und der zahnärztlichen Prüfung von August bis Dezember 1985 unterzogen. Die Approbation als Zahnarzt erfolgte am 19. Dezember 1985.

Ab Januar 1986 war ich 3 Monate in der Praxis meines Vaters Dr. Georg Rothlauf als Ausbildungsassistent tätig.

Vom 01. April 1986 bis 30. Juni 1987 leistete ich meinen Grundwehrdienst als Stabsarzt beim Lufttransportgeschwader 61 in Penzing/ Landsberg ab.

